

Grado en Ingeniería Mecánica  
Curso 2018-2019

*Trabajo Fin de Grado*

# Estudio y simulación del contacto rueda-rodillo en un sistema multicuerpo ferroviario

---

Jesús López Valero

Tutor/es

Alejandro Bustos Caballero

Leganés, julio de 2019.



*[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]*

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



Título: Estudio y simulación del contacto rueda-rodillo en un sistema multicuerpo ferroviario

Autor: Jesús López Valero

Tutor: Alejandro Bustos Caballero

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día 3 de Julio de 2019 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

# AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, agradecer a mi familia y a mis padres en especial, quienes me han apoyado en todo momento y han hecho todo lo posible para que pudiera labrarme un buen futuro y llegar a ser la persona que hoy soy.

A mis compañeros de piso y de universidad, con los que he podido compartir tanto buenos como malos momentos en todos los aspectos de la vida y quienes han ayudado enormemente a hacer esta etapa mucho más llevadera.

A mi tutor Alejandro Bustos Caballero, cuya ayuda y apoyo ha sido fundamental durante todo el desarrollo de este proyecto.

Por último, agradecer a mi novia Miriam, una persona fundamental en mi vida, con la que he podido compartir todos estos años de carrera y cuya paciencia y ánimos han sido imprescindibles durante todo mi progreso.

# RESUMEN

---

El proyecto presentado a continuación se enmarca dentro del sector ferroviario y dentro del mismo, trata el tema de los bancos de ensayos sobre rodillos, los cuales son muy utilizados para simular diferentes condiciones de circulación de una manera sencilla y económica.

Dicho trabajo ha sido realizado utilizando el programa informático de análisis multicuerpo *Universal Mechanism*, con el que se pueden simular multitud de situaciones.

En primera instancia, se crea el sistema multicuerpo, el cual se compone de un eje calado o *wheelset* apoyado sobre dos cilindros de pequeño espesor que hacen las veces de rodillos.

Posteriormente, se llevan a cabo las distintas simulaciones variando la velocidad lineal de circulación, el radio de los rodillos y la carga sobre el eje calado.

De esta forma se obtienen datos referentes a una serie de parámetros de interés para una única rueda, en este caso la izquierda:

- *Fxcreep*: fuerza de deslizamiento en sentido del movimiento.
- *Fycreep*: fuerza de deslizamiento en sentido transversal al movimiento.
- Fuerza normal: carga vertical a la que se ve sometido el *wheelset*.
- Presión: la que se ejerce sobre el área de contacto.
- Área de contacto: superficie de contacto entre ambos cuerpos.
- Área de adhesión: superficie dentro del área de contacto en la que se producen microsoldaduras.
- *Wear index*: índice de desgaste.

Los datos obtenidos son tratados para la obtención de gráficas que permitan visualizar su evolución a lo largo del tiempo de simulación.

**Palabras clave:** sistema multicuerpo, *wheelset*, banco de ensayos, bogie, rueda, rodillo, *Universal Mechanism*.

# ABSTRACT

---

The project presented below is framed within the railway sector, and within it, deals with the issue of test rigs, which are widely used to simulate different traffic conditions in a simple and economical way.

This work has been carried out using the Universal Mechanism multibody analysis software, with which a multitude of situations can be simulated.

Firstly, the multibody system is created, which consists of an openwork shaft or wheelset resting on the cylinders of small thickness that make the rollers times.

Later, the different simulations are carried out varying the linear speed of circulation, the radius of the rollers and the load on the wheelset.

In this way, we obtain data referring to a series of parameters of interest for a single Wheel, in this case the left:

- Fxcreep: creep force in the direction of movement.
- Fycreep: creep force in direction transversal to the movement.
- Normal force: vertical load to which the wheelset is subjected.
- Pressure: the one which is applied on the contact area.
- Contact area: contact surface between both bodies.
- Adhesion area: surface within the contact area in which micro-welds are produced.
- Wear index

The obtained data are treated to obtain graphs that allow visualize their evolution throughout the simulation time.

**Keywords:** multibody system, wheelset, test rig, bogie, wheel, roller, Universal Mechanism.

# ÍNDICE

---

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Ámbito y motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Estructura del documento .....	2
1.4 Entorno socioeconómico.....	3
 2. COMPLEMENTOS TEÓRICOS .....	5
2.1 Material rodante .....	5
2.2 La vía ferroviaria .....	10
2.3 Bancos de ensayo de material rodante .....	14
Introducción .....	14
Criterios de diseño.....	15
Componentes .....	16
Funcionamiento .....	17
2.4 Contacto rueda- carril .....	19
Introducción .....	19
Problema normal y problema tangencial.....	20
Contacto normal. Teoría de Hertz .....	20
Contacto tangencial. Teoría de Kalker .....	23
Métodos de resolución .....	25
 3. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA .....	27
3.1 Sistemas multicuerpo.....	27
3.2 Programas de simulación ferroviaria .....	27
3.3 Universal Mechanism.....	30
Módulo Input.....	31
Módulo Output .....	32

4. METODOLOGÍA.....	38
4.1 Antecedentes .....	38
4.2 Normativa aplicable .....	38
4.3 Creación y simulación del modelo.....	41
Creación del modelo.....	41
Simulación del modelo.....	45
Exportación y tratamiento de resultados .....	48
Análisis de resultados.....	51
 5. DESARROLLO DEL PROYECTO Y RESULTADOS .....	52
5.1 Análisis de las variables para cada velocidad .....	52
 6. CONCLUSIONES.....	79
6.1 Conclusiones .....	79
6.2 Trabajos futuros .....	82
 7. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO .....	83
7.1 Planificación .....	83
7.3 presupuesto .....	85
 8. REFERENCIAS .....	87



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Fig. 1. Bogie [4].....	6
Fig. 2. Eje [2].....	8
Fig. 3. Caja de grasa [2].....	9
Fig. 4. Inclinación lateral del carril [5] .....	11
Fig. 5. Tipos de explanaciones [2].....	11
Fig. 6. Partes de la superestructura de la vía [2].....	12
Fig. 7. Banco de rodillos [8] .....	14
Fig. 8. Escala reducida (Izqda). Escala real (Dcha) [7] .....	15
Fig. 9. Tipos de bancos de rodillos [7] .....	16
Fig. 10. Unidad de rodillos [9] .....	18
Fig. 11. Stma de transmisión con diferencial [9].....	18
Fig. 12. Teoría de Hertz aplicada al contacto rueda-carril [10].....	21
Fig. 13. Zona de contacto de Kalker [10] .....	23
Fig. 14. Coeficientes de Kalker en función de a y b.....	25
Fig. 15. Simpack [14] .....	28
Fig. 16. Vampire [15] .....	29
Fig. 17. VI-Rail [16].....	29
Fig. 18. Universal Mechanism [17] .....	31
Fig. 19. Módulo Input.....	32
Fig. 20. Módulo Output .....	33
Fig. 21. Inspector de simulación. Condiciones iniciales del modelo .....	34
Fig. 22. Inspector de simulación. Condiciones rueda/carril .....	34
Fig. 23. Ventana de animación .....	35
Fig. 24. Wizard of variables .....	36
Fig. 25. Ventana gráfica .....	37
Fig. 26. Condiciones del wheelset .....	41
Fig. 27. Geometría del rodillo .....	42
Fig. 28. Wheelset sobre rodillos .....	42
Fig. 29. Selección de eje de giro de los rodillos .....	43

Fig. 30. Selección de la fuerza que soporta el wheelset .....	44
Fig. 31. Lista de parámetros .....	44
Fig. 32. Edición de la velocidad angular de los rodillos.....	45
Fig. 33. Pestaña de variación de parámetros del modelo.....	45
Fig. 34. Selección de variables a estudio.....	46
Fig. 35. Ventana de gráficas de las variables .....	47
Fig. 36. Selección de condiciones de simulación .....	47
Fig. 37. Gráficas obtenidas de la simulación.....	48
Fig. 38. Resultados de la simulación en MS Excel .....	49
Fig. 39. Gráfica de cada variable para una velocidad en función de radio y carga .....	50
Fig. 40. Esquema de proceso .....	51
Fig. 41. Evolución de $F_{xcreep}$ para $V=5$ m/s.....	52
Fig. 42. Evolución de $F_{ycreep}$ para $V=5$ m/s.....	53
Fig. 43. Evolución de la Fuerza normal para $V=5$ m/s.....	54
Fig. 44. Evolución de la Presión en el contacto para $V=5$ m/s.....	55
Fig. 45. Evolución del Área de contacto para $V=5$ m/s.....	55
Fig. 46. Evolución del Área de adhesión para $V=5$ m/s.....	56
Fig. 47. Evolución de Wear index para $V=5$ m/s .....	57
Fig. 48. Evolución de $F_{xcreep}$ para $V=10$ m/s.....	58
Fig. 49. Evolución de $F_{ycreep}$ para $V=10$ m/s.....	59
Fig. 50. Evolución de la Fuerza normal para $V=10$ m/s.....	60
Fig. 51. Evolución de la Presión en el contacto para $V=10$ m/s.....	60
Fig. 52. Evolución del Área de contacto para $V=10$ m/s.....	61
Fig. 53. Evolución del Área de adhesión para $V=10$ m/s.....	62
Fig. 54. Evolución de Wear index para $V=10$ m/s .....	63
Fig. 55. Evolución de $F_{xcreep}$ para $V=15$ m/s.....	64
Fig. 56. Evolución de $F_{ycreep}$ para $V=15$ m/s.....	64
Fig. 57. Evolución de la Fuerza normal para $V=15$ m/s.....	65
Fig. 58. Evolución de la Presión en el contacto para $V=15$ m/s.....	66
Fig. 59. Evolución del Área de contacto para $V=15$ m/s.....	66
Fig. 60. Evolución del Área de adhesión para $V=15$ m/s.....	67
Fig. 61. Evolución de Wear index para $V=15$ m/s .....	68
Fig. 62. Evolución de $F_{xcreep}$ para $V=20$ m/s.....	69
Fig. 63. Evolución de $F_{ycreep}$ para $V=20$ m/s.....	70
Fig. 64. Evolución de la Fuerza normal para $V=20$ m/s.....	70

Fig. 65. Evolución de la Presión en el contacto para $V=20$ m/s.....	71
Fig. 66. Evolución del Área de contacto para $V=15$ m/s.....	72
Fig. 67. Evolución del Área de adhesión para $V=20$ m/s.....	72
Fig. 68. Evolución de Wear index para $V=20$ m/s .....	73
Fig. 69. Evolución de $F_{xcreep}$ para $V=25$ m/s.....	74
Fig. 70. Evolución de $F_{ycreep}$ para $V=25$ m/s.....	74
Fig. 71. Evolución de la Fuerza normal para $V=25$ m/s.....	75
Fig. 72. Evolución de la Presión en el contacto para $V=25$ m/s.....	76
Fig. 73. Evolución del Área de contacto para $V=25$ m/s.....	76
Fig. 74. Evolución del Área de adhesión para $V=25$ m/s.....	77
Fig. 75. Evolución de Wear index para $V=25$ m/s .....	78
Fig. 76. Diagrama de Gantt .....	84

# ÍNDICE DE TABLAS

---

TABLA. 1: VALORES DE “m” Y “n” EN FUNCIÓN DE $\theta$ .....	22
TABLA. 2: FXCREEP PARA $V=5$ m/s.....	52
TABLA. 3: FYCREEP PARA $V=5$ m/s.....	53
TABLA. 4: FUERZA NORMAL PARA $V=5$ m/s .....	54
TABLA. 5: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA $V=5$ m/s .....	54
TABLA. 6: ÁREA DE CONTACTO PARA $V=5$ m/s .....	55
TABLA. 7: ÁREA DE ADHESIÓN PARA $V=5$ m/s .....	56
TABLA. 8: WEAR INDEX PARA $V=5$ m/s.....	57
TABLA. 9: FXCREEP PARA $V=10$ m/s.....	58
TABLA. 10: FYCREEP PARA $V=10$ m/s.....	59
TABLA. 11: FUERZA NORMAL PARA $V=10$ m/s .....	59
TABLA. 12: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA $V=10$ m/s .....	60
TABLA. 13: ÁREA DE CONTACTO PARA $V=10$ m/s .....	61
TABLA. 14: ÁREA DE ADHESIÓN PARA $V=10$ m/s .....	62
TABLA. 15: WEAR INDEX PARA $V=10$ m/s.....	62
TABLA. 16: FXCREEP PARA $V=15$ m/s.....	63
TABLA. 17: FYCREEP PARA $V=15$ m/s.....	64
TABLA. 18: FUERZA NORMAL PARA $V=15$ m/s .....	65
TABLA. 19: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA $V=15$ m/s .....	65
TABLA. 20: ÁREA DE CONTACTO PARA $V=15$ m/s .....	66
TABLA. 21: ÁREA DE ADHESIÓN PARA $V=15$ m/s .....	67
TABLA. 22: WEAR INDEX PARA $V=15$ m/s.....	67
TABLA. 23: FXCREEP PARA $V=20$ m/s.....	68
TABLA. 24: FYCREEP PARA $V=20$ m/s.....	69
TABLA. 25: FUERZA NORMAL PARA $V=20$ m/s .....	70
TABLA. 26: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA $V=20$ m/s .....	71
TABLA. 27: ÁREA DE CONTACTO PARA $V=20$ m/s .....	71
TABLA. 28: ÁREA DE ADHESIÓN PARA $V=20$ m/s .....	72
TABLA. 29: WEAR INDEX PARA $V=20$ m/s.....	73

TABLA. 30: FXCREEP PARA $V=25$ m/s.....	73
TABLA. 31: FYCREEP PARA $V=25$ m/s.....	74
TABLA. 32: FUERZA NORMAL PARA $V=20$ m/s .....	75
TABLA. 33: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA $V=25$ m/s .....	75
TABLA. 34: ÁREA DE CONTACTO PARA $V=25$ m/s .....	76
TABLA. 35: ÁREA DE ADHESIÓN PARA $V=25$ m/s .....	77
TABLA. 36: WEAR INDEX PARA $V=25$ m/s.....	77
TABLA. 37: COSTE DE PERSONAL.....	85
TABLA. 38: COSTE DE EQUIPOS.....	85
TABLA. 39: COSTE DE SOFTWARE .....	85
TABLA. 40: COSTES TOTALES .....	86

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Ámbito y motivación

El uso del ferrocarril está muy presente en la vida de todos desde su impulso con la Revolución Industrial. Desde ahí ha ido creciendo constantemente y de manera exponencial, en cuanto a mejoras se refiere, hasta el día de hoy.

Es un medio de transporte muy utilizado diariamente ya que dispone de unas grandes ventajas frente a otros tipos de transporte, tanto en el transporte de mercancías como de pasajeros. Entre estas cabe destacar la gran velocidad a la que pueden llegar a circular, su menor consumo de combustible, lo que deriva en menor contaminación, gran capacidad de carga y principalmente el bajo índice de accidentes que se producen en este sector.

En España este sector es uno de los grandes motores del país, ya que cuenta con una amplia red de vías por todo el territorio nacional, lo que permite una gran ventaja en cuanto a transporte se refiere. Además también dispone de grandes empresas reconocidas internacionalmente, como por ejemplo Talgo, lo que demuestra que nos encontramos en una situación privilegiada dentro del sector.

Debido a este gran desarrollo y a la constante implantación de mejoras, se necesitan llevar a cabo análisis detallados para conseguir altas velocidades de circulación junto a un descenso de los accidentes. Los estudios de este tipo pueden realizarse utilizando programas informáticos que nos permitan conocer de la mejor forma posible el comportamiento de un vehículo ferroviario ante cualquier cambio que pueda presentar.

Esto nos permite además optimizar el uso de los recursos que dispongamos abaratando costes.

Un método muy utilizado para recrear las condiciones de funcionamiento de un vehículo ferroviario de una manera más simple es el estudio de un *wheelset* sobre un banco de rodillos.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es, como su propio nombre indica:

*“El estudio y simulación del contacto rueda-rodillo en un sistema multicuerpo ferroviario”.*

Sin embargo, para cumplir ese objetivo es necesario llevar a cabo una serie de pautas y procesos que permitan concluir el estudio gratamente, entre las que se encuentran:

- Diseñar el sistema multicuerpo adecuadamente para los estudios que se han de llevar a cabo.
- Seleccionar las variables de interés que van a ser analizadas en función de diversos parámetros.
- Definir el rango de radios de rodillo a utilizar, la carga que va a actuar sobre el *wheelset* y las velocidades a las que este se va a someter.
- Crear una metodología óptima de las simulaciones para facilitar el posterior tratamiento de los resultados obtenidos.
- Realizar un correcto tratamiento de los resultados a fin de obtener gráficas que permitan extraer conclusiones.

Dicha meta se alcanza utilizando como herramienta principal el programa informático de análisis multicuerpo Universal Mechanism, con el que en primer lugar desde el módulo *Input* se creará el modelo, y posteriormente desde el módulo *Output* se simularán las diferentes situaciones de circulación.

A continuación, los resultados obtenidos serán tratados utilizando el programa MS Excel, mediante el que se obtendrán diferentes representaciones de la evolución de cada parámetro en función de las condiciones impuestas. Todo ello permitirá obtener conclusiones del proyecto realizado, las cuales serán expuestas en esta memoria del proyecto utilizando el procesador de texto MS Word.

## 1.3 Estructura del documento

Los capítulos que se han seguido en la realización del proyecto son los siguientes:

### **Capítulo 1: Introducción**

En él se introduce el tema sobre el que versa el proyecto y los objetivos que se quieren conseguir con el mismo.

### **Capítulo 2: Complementos teóricos**

Se definen conceptos relacionados con el ferrocarril, los bancos de ensayo o los sistemas multicuerpo.

### **Capítulo 3: Descripción de la herramienta**

En este apartado se describe el funcionamiento básico y los diferentes módulos de trabajo del programa Universal Mechanism.

#### **Capítulo 4: Metodología**

En este capítulo se incluyen los antecedentes sobre los que surge el proyecto, la normativa aplicable a estudios de este estilo y los pasos seguidos para la creación y simulación del modelo en UM.

#### **Capítulo 5: Desarrollo del proyecto y resultados**

Aquí se presentan los resultados obtenidos de cada simulación ya tratados y expuestos gráficamente.

#### **Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros**

En este apartado se exponen las interpretaciones de los resultados obtenidos y se presentan algunos estudios factibles para complementar o mejorar este proyecto académico.

#### **Capítulo 7: Presupuesto**

Se cumplimenta la planificación temporal seguida en el desarrollo del proyecto y los costes derivados de la realización del mismo.

#### **Capítulo 8: Referencias y bibliografía**

En este último capítulo se indican numerados los diferentes documentos consultados durante el desarrollo del proyecto.

### **1.4 Entorno socioeconómico**

El tema sobre el que se basa este proyecto se enmarca dentro del sector ferroviario, por lo que es necesario realizar una breve explicación de la situación económica y social en la que se encuentra España, y como las empresas de este sector desarrollan su actividad.

Nuestro país tardó en implantar un sistema ferroviario semejante al que disponían en países como Japón, Francia o Alemania. Sin embargo, con la llegada de la línea que conectaba Madrid con Sevilla en 1992, España logró hacerse un hueco dentro de la alta velocidad.

A partir de este momento y debido a su gran intención en desarrollar tecnologías nacionales, España ha ido creciendo rápidamente obteniendo una posición privilegiada tanto a nivel nacional como internacional.

Durante esos más de 25 años se han invertido 51.775 millones de euros en desarrollo ferroviario, con lo que se ha podido implantar la red de alta velocidad más extensa de Europa y la segunda a nivel mundial, únicamente superada por China.



Todo ello hace que España sea un principal exportador de tecnología ferroviaria, como bien se ve en el liderazgo en proyectos de gran relevancia como las líneas de alta velocidad Ankara-Estambul (Turquía), Medina-La Meca (Arabia Saudí) o Madrid-Barcelona-Lyon-París (España-Francia) entre otras.

En 2006 el sector ferroviario español exportaba unos 500 millones de euros, a partir de del 2011 esta cifra superó los 1.000 millones y durante los años siguientes se consiguieron los 1.500 millones de euros en exportaciones, lo que hace ver el gran crecimiento que ha experimentado el sector en los últimos años.

Dicho crecimiento beneficia en consecuencia a las pymes, arrastradas por grandes empresas como Talgo, las cuales trabajan activamente en la realización de proyectos de esta talla, y por lo tanto se produce una mejora del entorno socioeconómico de las zonas sobre las que actúan. [1]

Por todo lo comentado anteriormente, es fácil afirmar que España está a la vanguardia de la innovación y tecnología, todo ello debido a los constantes proyectos de investigación y mejora tanto de las infraestructuras ferroviarias, como del material rodante y sus numerosas condiciones de circulación.

Para continuar con esa ferviente investigación tecnológica, en este proyecto se ha querido reflejar un campo de estudio que de pie a posibles investigaciones futuras.

Dicho campo de estudio es el de los bancos de ensayos de material rodante, en los que se recrean numerosas condiciones de circulación de manera sencilla y poco costosa.

Esto, permite obtener diversas mediciones de parámetros que son necesarias para asegurar condiciones de seguridad y optimizar el diseño, tanto de los vehículos ferroviarios como de la propia vía.

## 2. COMPLEMENTOS TEÓRICOS

---

En este apartado se describen las partes principales que forman el ferrocarril: el material rodante y la vía [2].

También se definen posteriormente los conceptos básicos referentes a los bancos de ensayo de material rodante.

### 2.1 Material rodante

Es todo aquello que es apto para circular por líneas ferroviarias.

Se puede dividir en:

- Material motor: aquel que dispone de un motor para su propulsión.
  - Material tractor: es la parte motorizada que se encarga de remolcar el otro material de carga y sobre la que no se permite transportar carga útil.
  - Vehículo automotor: provisto de motor y utilizado para el transporte de carga y ocasionalmente para remolcar otros vehículos.
  - Material auxiliar: destinado a prestar servicio a los tipos de material motor anteriores.
- Material remolcado: es aquel que para su movimiento necesita ser enganchado al material motor.
  - Coche: vehículo destinado al transporte de personas.
  - Furgón: vehículo destinado al transporte de equipajes.
  - Vagón: vehículo destinado al transporte de animales y mercancías.
  - Material auxiliar: destinado a servicios auxiliares de la explotación ferroviaria.

Elementos principales que componen el material rodante:

## 1. Coche

Caja formada por una carrocería asociada a un bastidor por una estructura autoportante.

Los materiales más utilizados en su construcción son el acero al carbono, el aluminio y el acero inoxidable.

## 2. Bogie

Dispositivo formado por dos o más ejes, cada uno con dos ruedas, sobre los que se apoya el vehículo ferroviario para garantizar el correcto desplazamiento sobre los raíles (ver figura 1). [3]

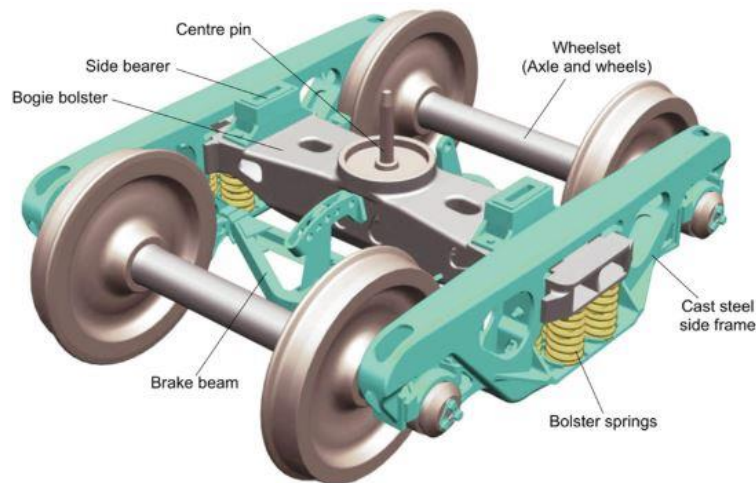


Fig. 1. Bogie [4]

Sus funciones principales son:

1. Soportar la carrocería del vehículo.
2. Proporcionar estabilidad en el ferrocarril minimizando los efectos que se producen en la circulación por curva y los originados por irregularidades en la vía.
3. Garantizar el confort de los pasajeros absorbiendo vibraciones.
4. Garantizar el correcto desplazamiento del vehículo sobre la vía.

Para conseguir todo esto, en el bogie los esfuerzos de tracción y frenado se transmiten desde el bastidor a la caja de la locomotora mediante barras de tracción.

Cada una de ellas está compuesta por una barra horizontal articulada en el punto más bajo del bastidor y otra inclinada respecto al carril apoyado sobre una pieza anclada en la parte inferior de la caja.

Por lo general, se colocan dos bogies en cada coche, vagón o locomotora, uno en cada extremo.

Estos elementos pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Bogie motor
- Bogie remolque: no portan ni el motor ni la reductora por lo que su diseño es más sencillo que el de los bogies motores.

Por otro lado, las partes fundamentales por las que está compuesto este dispositivo son el bastidor y los reductores.

- Bastidor: estructura con forma de “H” constituida por los largueros y las traviesas unidos entre sí formando un conjunto rígido. Su finalidad es la de servir de estructura principal del bogie sobre la que se montan los demás componentes.
- Reductores: sistemas de engranajes que permiten conseguir el par motor necesario en cada momento.

### 3. Ruedas

Las ruedas, como en cualquier vehículo, son unos de los elementos más importantes ya que son las encargadas de transmitir el par de nuestro vehículo a la superficie sobre la que estamos circulando. Sin embargo, en vehículos ferroviarios cobran aún más importancia debido a que estas han de estar siempre en contacto con los carriles, que son los que fuerzan la trayectoria que va a seguir dicho vehículo.

En las ruedas de ferrocarril, se pueden distinguir dos partes fundamentales: el centro y la llanta.

El centro es la parte que dura indefinidamente a diferencia de la llanta, la cual al verse sometida a desgaste e impactos con la vía precisa ser reparada o reemplazada.

La superficie de rodadura de estos elementos presenta una forma cónica, cuya función es la misma que un diferencial de un vehículo automóvil, dotar a cada rueda de un mismo eje de una velocidad lineal distinta dependiendo de la curva que estén trazando. En esta situación la rueda que circula por el exterior de la curva se apoyará sobre el rail con un diámetro mayor al de la rueda que circula por el interior de la curva.

Otra característica fundamental de las ruedas es la presencia de unas pestañas en el interior, lo que garantiza el correcto guiado del vehículo y evita, dentro de lo posible, el descarrilamiento del vehículo.

## 4. Ejes

En el eje de un ferrocarril se distinguen las siguientes partes principales (ver figura 2):

- Fuste o cuerpo del eje comprendido entre ambas ruedas
- Secciones de calaje sobre las que se calan las ruedas
- Manguetas, sobre las que reposan los cojinetes que a su vez soportan el peso del vehículo.

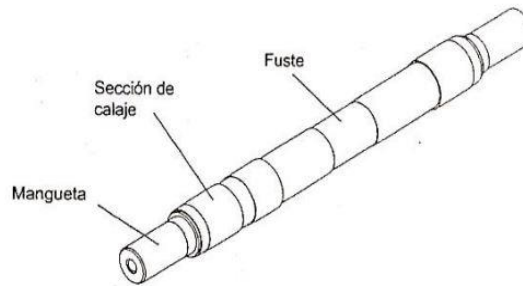


Fig. 2. Eje [2]

Estos elementos suelen presentar numerosos problemas de fatiga, lo que ha forzado que se elaboren normativas cada vez más estrictas en lo que a su diseño se refiere. Estas fases de diseño son:

- Identificar fuerzas y calcular momentos en las secciones críticas.
- Seleccionar diámetros adecuados para el cuerpo y las manguetas.

Por otro lado, al conjunto eje y sus dos ruedas, caladas sobre él, se le denomina eje montado. Dichas ruedas han de estar correctamente caladas, de acuerdo a las especificaciones que disponga cada ferrocarril.

Además del perfecto equilibrado de las ruedas, el centro de gravedad del eje montado ha de coincidir con el teórico, para evitar así fuerzas de alabeo sobre el eje que fuercen las pestañas contra el carril.

## 5. Caja de grasa

Es el elemento que transmite todos los esfuerzos y permite el giro del propio eje, garantizando de esta forma el enlace entre el eje y la suspensión (ver figura 3).

Hoy en día se utilizan rodamientos lubricados que disponen de una jaula de material compuesto además de unos elementos de cierre que aumentan su vida útil.

Además de estas mejoras, se están utilizando cada vez en mayor medida rodamientos sensorizados que permiten medir la velocidad de giro, la temperatura y que detectan un posible bloqueo de la rueda. Con todo esto se mejora notablemente el control del vehículo y el mantenimiento de los cojinetes.

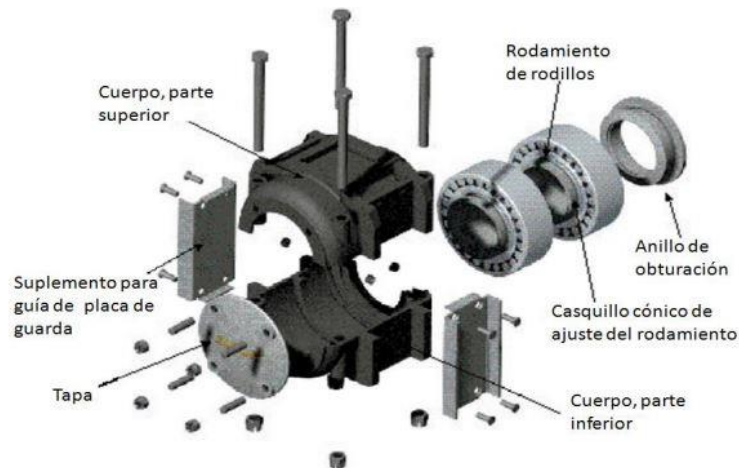


Fig. 3. Caja de grasa [2]

## 6. Suspensión

Se denomina de esta forma al conjunto de dispositivos elásticos que proporcionan protección de los órganos del vehículo, estabilidad independientemente de las condiciones de circulación y comodidad de los pasajeros o protección de las mercancías.

La mayoría de los vehículos ferroviarios utilizan dos etapas de suspensión claramente diferenciables:

- **Suspensión primaria:** conjunto de elementos mecánicos e hidráulicos, situados entre los ejes y el bastidor, que amortiguan los esfuerzos transmitidos de la rueda al bogie. Su función es reducir vibraciones en el bastidor y asegurar un reparto homogéneo de cargas sobre las ruedas, lo que se traduce en un correcto guiado de las mismas. De esta forma se mejoran las prestaciones de freno y tracción.
- **Suspensión secundaria:** conjunto de elementos mecánicos, neumáticos o hidráulicos, que amortiguan los movimientos relativos entre la caja y el bogie.

Este tipo de suspensión se encarga de filtrar todas las vibraciones que sufra el vehículo tanto en dirección vertical como lateral.

La suspensión en un vehículo ferroviario está formada por los siguientes elementos principalmente:

- **Elementos elásticos:** aseguran la unión entre los elementos de rodadura y el vehículo. Existen diferentes componentes de este tipo, como pueden ser:
  - **Ballestas:** elemento formado por hojas de acero superpuestas entre sí cuyas principales ventajas son su bajo coste, su amortiguamiento propio y la capacidad de producir un correcto guiado lateral y longitudinal.

- Resortes helicoidales: fabricados de acero de gran resistencia formando una hélice que trabaja a flexión. Las principales ventajas de estos dispositivos son la regulación tan precisa que permiten además de ser muy compactos.

En algunos vehículos, estos elementos se colocan concéntricamente, lo que permite una disposición de resortes en paralelo, otorgando así más resistencia además de optimizar el espacio.

- Muelles de elastómeros: elementos fabricados de caucho o materiales compuestos que eliminan vibraciones de alta frecuencia, reduciendo así el ruido, y que evitan el desgaste entre superficies con deslizamiento.
- Suspensión neumática: se implanta en vehículos donde la carga puede representar el doble de la tara. Sus principales ventajas son la dificultad de variación del comportamiento, independientemente de las condiciones de funcionamiento, y la capacidad de mantener la altura de suspensión constante.

➤ **Elementos amortiguadores**: tienen como misión devolver en el mínimo tiempo posible el resorte a su posición, absorbiendo la energía cinética transmitida a la masa suspendida.

- Amortiguadores de fricción: se utilizan en suspensiones de vagones de mercancías debido a su simplicidad y bajo coste.
- Amortiguadores hidráulicos: actualmente son los más extendidos en el ámbito ferroviario debido a que en ellos la fuerza amortiguadora crece con la velocidad.

## 2.2 La vía ferroviaria

Con este término denominamos al camino de rodadura además de las instalaciones necesarias para su explotación.

Tiene como funciones principales el guiado del material rodante y la sustentación de las cargas.

Las características principales que le dan a la vía toda su funcionalidad son las siguientes [5]:

1. Flexibilidad: proporcionada por la absorción de esfuerzos dinámicos.
2. Continuidad: tanto geométrica, como estática y dinámica, lo que obliga a tener en cuenta el efecto de la temperatura en el diseño.
3. Robustez: en función del tipo de cargas del tráfico permite soportar esfuerzos longitudinales, verticales y transversales.
4. Inclinación lateral del carril: suele variar entre 1:20 y 1:40 y con ella se consigue estabilidad (ver figura 4).
5. Juego de vía: holgura que existe entre el ancho de vía y el ancho de ejes de ruedas.

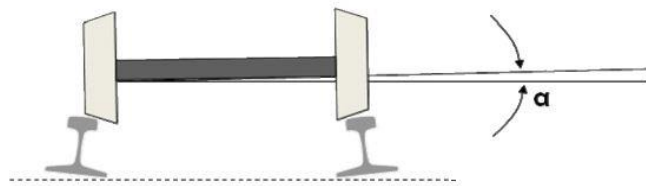


Fig. 4. Inclinación lateral del carril [5]

Dentro del camino de rodadura o vía diferenciamos dos partes:

- **Infraestructura**: terreno base sobre el que se asienta la vía también denominado explanación o plataforma. Está compuesta por numerosas obras de defensa (muros de contención, drenajes, etc.) y por las obras de fábrica (túneles, puentes, viaductos, etc.)

Se pueden distinguir diferentes tipos de explanaciones (ver figura 5).

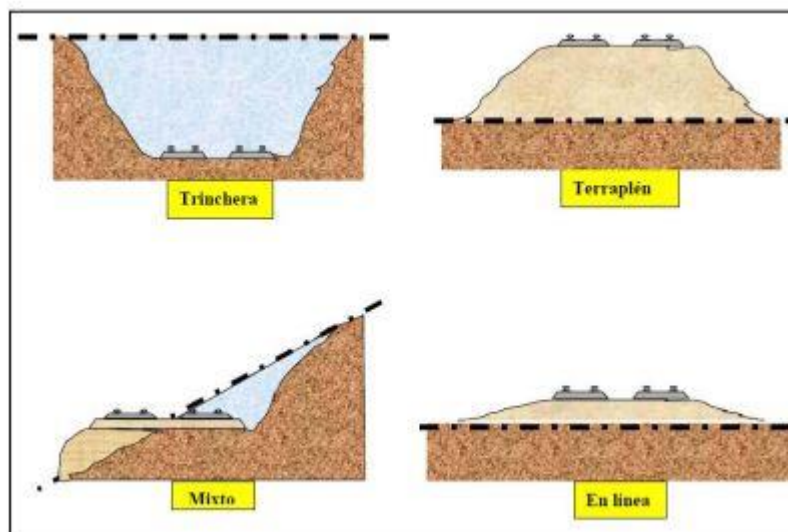


Fig. 5. Tipos de explanaciones [2]



- **Superestructura:** comprende la vía y los aparatos e instalaciones necesarios para que el vehículo ferroviario circule correctamente.

Las partes que integran la superestructura son las siguientes (ver figura 5):

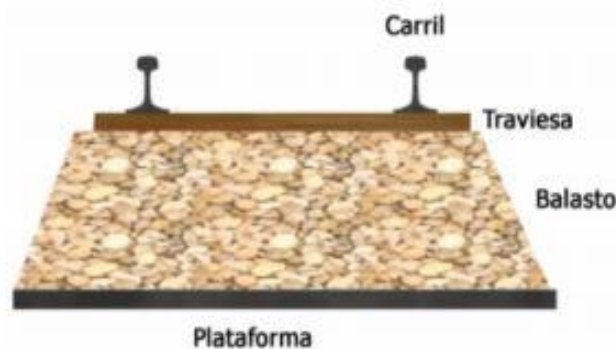


Fig. 6. Partes de la superestructura de la vía [2]

- **Plataforma:** parte más profunda de la estructura de la vía que representa la base del camino de rodadura del vehículo.

Sus funciones principales son:

- Servir de estructura de apoyo.
  - Soportar esfuerzos estáticos y dinámicos.
  - Evitar deformaciones en la vía.
  - Drenar y evacuar aguas.
- **Capas de asiento:** capa de apoyo formada por un material granulado grueso denominado balasto.

El balasto es un elemento constructivo de las banquetas de numerosas líneas férreas, por lo que ha de garantizar una serie de especificaciones:

- Soportar el peso de las traviesas.
- Afianzar la vía restringiendo movimientos laterales y longitudinales.
- Permitir el drenaje y la evacuación rápida de aguas.
- Impedir el crecimiento de la vegetación.
- Facilitar el mantenimiento.

En la construcción del balasto se utilizan materiales como granito, basalto o grava debido a su mayor capacidad de soportar cargas. Además, es necesario garantizar una determinada dureza a compresión y una gran resistencia al desgaste para que el conjunto se mantenga elástico el mayor tiempo posible.

- Carril: elemento que recibe directamente las cargas de los elementos rodantes del vehículo y que garantiza el correcto guiado de los vehículos en la trayectoria predefinida.

Está compuesto por varias partes:

- Cabeza: parte superior que constituye la superficie de rodadura y cuenta con una forma determinada para que las ruedas se adapten bien al carril.
  - Alma: parte central que transmite las solicitaciones exteriores desde la cabeza al patín.
  - Patín: parte inferior del carril que transmite las cargas a los otros elementos de la vía y aporta estabilidad al carril.
- Traviesa: elementos situados transversalmente al eje de la vía y embebidos en el balasto para permitir la fijación de los carriles.

Sus funciones principales son la de aportar elasticidad mientras mantienen una rigidez suficiente para soportar esfuerzos y evitar la transmisión de corriente que pasa por ellas.

Existen diferentes tipos en función del material en el que estén fabricadas.

Estos materiales son:

- Madera: proporcionan flexibilidad, resistencia flexión y aislamiento térmico, sin embargo su vida útil es menor que en traviesas de otros materiales.
- Metal: son ligeras, lo que ocasiona problemas de estabilidad a altas velocidades o con cargas pesadas, ruidosas y generan problemas de aislamiento.
- Hormigón: construidas con este material existen dos tipos de configuraciones.
  1. *Hormigón bibloque*: el balasto no está en contacto con la parte central de la traviesa por lo que el hormigón no está sometido a tracción. Sin embargo, este contacto limitado reduce la resistencia a altas velocidades de circulación.
  2. *Hormigón monobloque*: la superficie de contacto con el balasto es superior, y por lo tanto su capacidad de soportar y transmitir fuerzas también lo es.

## 2.3 Bancos de ensayo de material rodante

### **Introducción**

Los bogies son la parte central de los vehículos ferroviarios y su función principal es la de soportar la estructura del tren y conducir al vehículo por la vía. Debido a su alta sollicitación y a que dispone de una compleja estructura técnica compuesta por numerosos elementos, pueden producirse infinidad de fallos.

Ante esto se llega a la necesidad de crear sistemas de monitoreo confiables y robustos que garanticen la integridad de sus partes principales. [6]

Para llevar a cabo estos estudios surge el concepto de los bancos de rodillos a escala (ver figura 5), los cuales son muy utilizados en los centros de investigación ferroviarios, donde se estudian parámetros como la estabilidad dinámica, la comodidad o el contacto rueda carril.

Sus principales beneficios son la alta capacidad de control, repetibilidad y flexibilidad en la configuración del experimento además de su reducido coste y sencillez frente a estudios de este tipo a gran escala.

Otra ventaja que tienen estos sistemas de ensayo a pequeña escala es que son una buena herramienta educativa para los alumnos de ingeniería de muchas universidades, a los que se les puede dotar de conocimientos básicos sobre fundamentos de la dinámica del vehículo. [7]

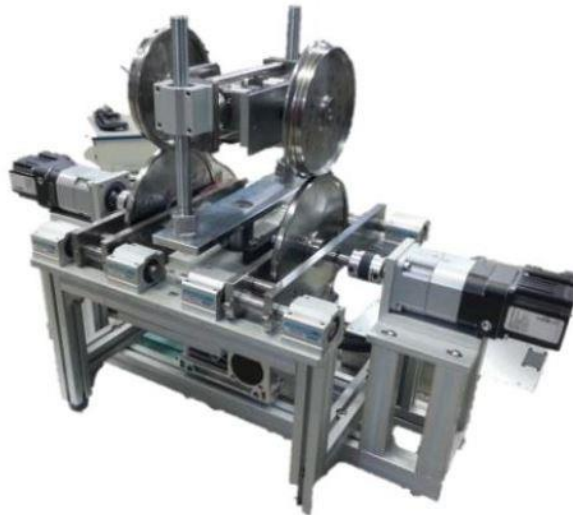


Fig. 7. Banco de rodillos [8]

Los bancos de rodillos están basados en sustituir la vía por unos rodillos con el perfil del raíl a lo largo de su circunferencia. Aunque en estos ensayos el vehículo permanece fijo sin velocidad longitudinal, sus condiciones en el contacto rueda-rodillo son muy

parecidas a las condiciones que se presentan en rueda-carril en un ensayo directamente sobre la vía, por lo que son muy recomendables.

Son utilizados especialmente en casos donde es necesario llevar a cabo experimentos bajo condiciones específicas o cuando el vehículo es probado en situaciones extremas, como por ejemplo en el límite de descarrilamiento, cuando no es posible garantizar todas las medidas de seguridad en un ensayo sobre la vía. Por esto, el uso de estos bancos de ensayo es fundamental durante el periodo inicial de desarrollo del vehículo ferroviario, donde se ensayan nuevos componentes ferroviarios que afectan directamente a la seguridad en circulación [7].

## **Criterios de diseño**

El diseño de estos sistemas varía dependiendo del propósito y los objetivos que se quieren conseguir con sus experimentos. Cada banco de rodillos es único y sus criterios de diseño son:

1. Escala
2. Muestras ensayadas
3. Tipo de diseño

La escala divide al banco de rodillos en dos categorías: escala real y escala reducida (ver figura 7).

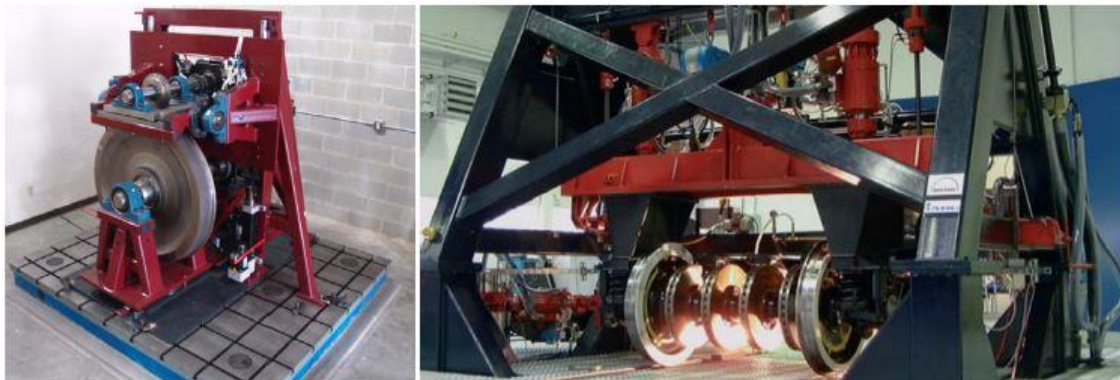


Fig. 8. Escala reducida (Izqda). Escala real (Dcha) [7]

Los diseños a escala ofrecen numerosas ventajas, como por ejemplo menores inversiones, menor coste de operación, menor consumo energético, espacios de trabajo más reducidos y mayor facilidad en el estudio de parámetros de interés. Sin embargo, en lugar de componentes ferroviarios estándar o vehículos reales solo pueden ensayarse modelos a escala, por lo que la interpretación de los resultados obtenidos no es directa al depender de la estrategia de la escala elegida.

También existe distinción dependiendo de los elementos ensayados, como puede ser la rueda individual, el eje calado (*wheelset*), el bogie o el vehículo completo.

Un ensayo de un *wheelset* aumenta la complejidad del sistema significativamente frente al diseño que implicaría una rueda individual, sin embargo ofrece ventajas en la capacidad de estudiar la relación que existe entre el eje y la suspensión.

Por otro lado estudiar un bogie o el vehículo completo eleva enormemente la complejidad respecto a los casos anteriores pero ofrece multitud de beneficios, ya que permite obtener un estudio del vehículo ferroviario como un sistema completo.

Existen varios diseños de bancos de rodadura. El más común, y sobre el que se ha basado este proyecto, es el de rodillo plano vertical (a). Además de este existen otras configuraciones como las basadas en un rodillo perpendicular (b), en uno interno (c), o en un rail oscilante (d) [7].

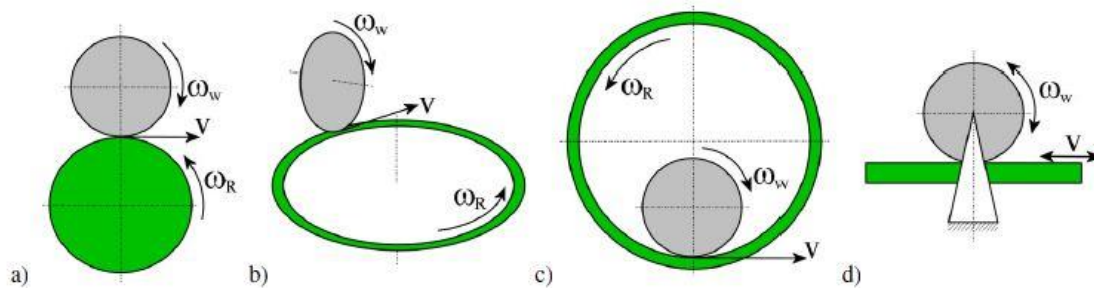


Fig. 9. Tipos de bancos de rodillos [7]

## Componentes

En los bancos de rodillos, unos actuadores hidráulicos llevan a cabo los movimientos en los ejes Y y Z, mientras que la rotación respecto del eje Y se consigue mediante un motor.

Las plataformas de rodillos están compuestas por numerosos subsistemas como la unidad de prueba, el sistema de conducción, el sistema hidráulico, el sistema de monitoreo y el sistema de adquisición y análisis de datos [6].

- **Unidad de prueba:** el banco de rodillos dispone de unidades de testeo que son independientes y pueden ser movidas dependiendo de las distintas configuraciones del vehículo. Cada unidad está formada por una unidad de rodillos y otra de conducción.
- **Sistema de conducción:** permite proporcionar diferentes velocidades de giro y torque a los rodillos, a través de una junta universal. Además, permite asegurar

que si existen numerosos juegos de rodillos, estos giren casi síncronamente sin ningún tipo de conexión mecánica.

- **Sistema hidráulico:** los movimientos de los rodillos en dirección vertical y horizontal son proporcionados por actuadores hidráulicos. Dentro del banco de ensayo existen dos actuadores por cada rodillo, uno por cada dirección de desplazamiento.
- **Sistema de monitoreo:** se encarga de supervisar el funcionamiento de la plataforma de rodillos, controlando parámetros como la velocidad, el par, la temperatura de los cojinetes o la lubricación. Por otro lado, a través del sistema de video, el estado del rodillo, del vehículo y el contacto rueda-rodillo pueden ser monitoreados.
- **Sistema de adquisición y análisis de datos:** de acuerdo con las normas de evaluación de pruebas de un vehículo ferroviario, las respuestas del vehículo testado han de ser registradas durante dicha prueba. Este sistema se encarga de medir las señales de desplazamientos, velocidad, aceleración, tensión, presión, temperatura, etc. Una vez medidas, estas señales se acondicionan y se envían a un ordenador para facilitar su estudio.

## **Funcionamiento**

El estudio del contacto rueda-rodillo requiere un posicionamiento preciso de rueda y rodillo además de un control minucioso de la velocidad de ambos y de la carga que soporta el conjunto, además de una simulación de los parámetros referentes al punto de contacto lo más parecida posible a las condiciones de la vía. Sin embargo, el diámetro finito del rodillo causa una serie de errores inevitables entre la rueda y el rodillo.

Debido a esto, para reducir estos errores se lleva a cabo un aumento del diámetro del rodillo en las configuraciones de rodillo vertical, interno u horizontal. Con esto se consigue acercar al rodillo a la configuración ideal que se conseguiría con un radio infinito, o lo que es lo mismo, una recta simulando el carril. [6]

Una característica remarcable de algunos bancos de rodillos es que permiten girar a ambos rodillos a velocidades distintas, por lo que se puede simular la circulación del wheelset por curva. Esto se consigue mediante un complejo diferencial. El principio de este sistema se basa en que no existe un acoplamiento directo entre ambos rodillos (ver figura 10).

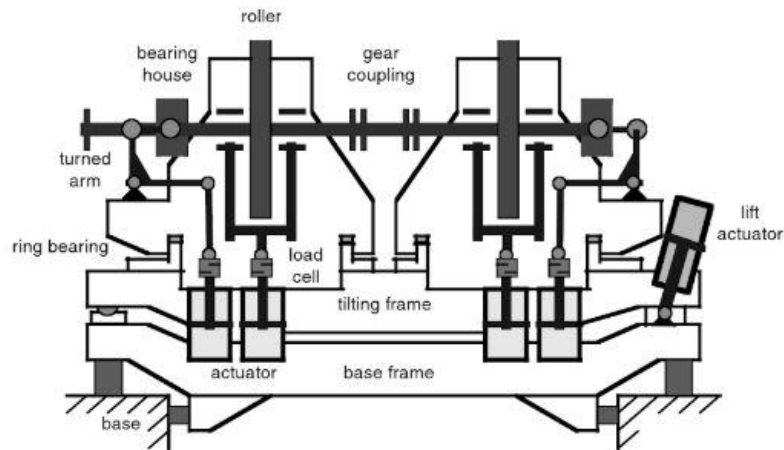


Fig. 10. Unidad de rodillos [9]

Para conseguir este propósito (ver figura 11), el movimiento del rodillo derecho se consigue transmitiendo directamente la fuerza a través de un eje y una junta universal.

Para mover el rodillo izquierdo, primero se transmite el movimiento generado por el motor, primero a través del sistema de engranajes cónicos II y posteriormente al diferencial.

Cuando este movimiento pasa por el diferencial, la velocidad de entrada del eje puede ser distinta a la de salida según sea la velocidad del motor. Esta velocidad modificada se transmite entonces al rodillo izquierdo pasando a través de los sistemas cónicos III y VI.

Con esto se consigue que el rodillo izquierdo tenga la misma velocidad angular que el derecho pero contando con una velocidad lineal distinta, con lo que se consigue simular eficientemente la circulación en curva [9].

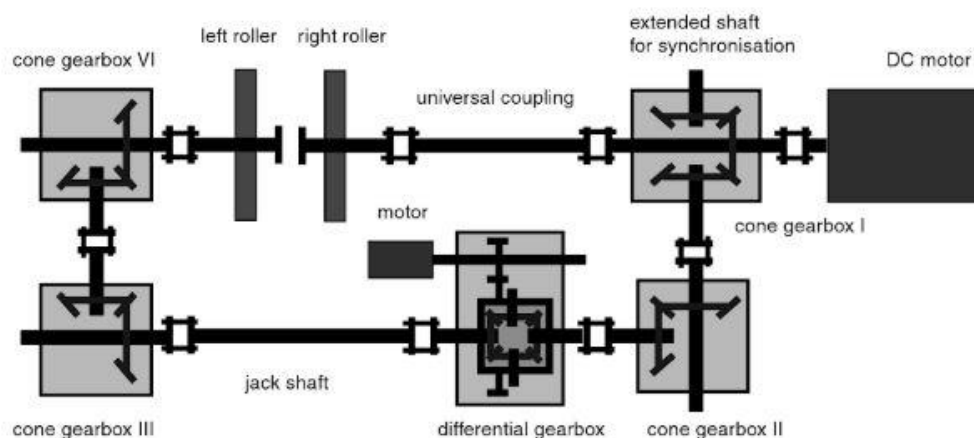


Fig. 11. Stma de transmisión con diferencial [9]



## 2.4 Contacto rueda- carril

### **Introducción**

El estudio de la zona de contacto se basa en el análisis del comportamiento de dos sólidos elásticos sometidos a un movimiento de rodadura y a otro de deslizamiento.

Este fenómeno es uno de los más importantes en lo referente a la dinámica de los vehículos ferroviarios, por lo que ha sido muy estudiado desde la creación de los primeros ferrocarriles. Es un elemento condicionante, ya que sobre este recae gran parte de la correcta circulación del vehículo sobre la vía.

El contacto entre el material rodante y el carril genera dos fuerzas que actúan en la zona de contacto: las fuerzas normales y las tangenciales. Ambas fuerzas se originan debido a los fenómenos simultáneos de rodadura y fricción seca.

Las deformaciones tangenciales entre ambos cuerpos sometidos a alta presión y temperatura, provocan el fenómeno conocido como *creep* o fluencia, que es uno de los parámetros estudiados más adelante. Este hecho es el que origina las fuerzas tangenciales mencionadas anteriormente, las cuales están íntimamente relacionadas con la fluencia.

Durante el siglo XX surgieron diferentes teorías que intentaban definir las características de este fenómeno de contacto entre cuerpos. Entre todas ellas las más destacables son [10]:

- **Teoría de Carter (1926):** considera la superficie de contacto como una zona rectangular. Esta hipótesis es válida para ciertos niveles de desgaste del rail, pero no para un contacto convencional. Además, comete el error de considerar únicamente los pseudodeslizamientos longitudinales.
- **Teoría de Johnson y Vermeulen (1964):** define la forma de contacto como un elipsoide dividido en dos regiones asimétricas: la región de adhesión y la de deslizamiento.
- **Teoría de Kalker (1967):** se basa en fuerzas de contacto tangenciales y pseudodeslizamientos lineales. Minimiza el área de deslizamiento para pseudodeslizamientos muy pequeños, longitudinales, transversales y de giro.

Todas estas teorías están basadas en la teoría del contacto de Hertz, que se será comentada a continuación. Además, se desarrollará más a fondo la teoría de Kalker, ya que es en la que se basan programas multicuerpo como el Universal Mechanism, programa utilizado en este proyecto para el análisis de diversos parámetros referentes al contacto.

### **Pseudodeslizamientos**

Se producen cuando existe movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto. De esta forma surgen dos tipos de movimientos:



- **Rodadura pura:** se origina cuando el punto de contacto rueda-carril cuenta con velocidad nula.
- **Deslizamiento puro:** movimiento de fricción sin rodadura entre ambos cuerpos. Se origina cuando la velocidad tangencial llega al límite de fricción.

La zona de contacto rueda- carril se puede dividir en una zona de adhesión y otra de deslizamiento, originada cuando los movimientos anteriores ocurren simultáneamente.

De esta forma, existe una zona de deslizamiento conocida como pseudodeslizamiento, que ocurre cuando nos encontramos por debajo del límite de fricción de la fuerza tangencial [10].

### **Problema normal y problema tangencial**

Las condiciones que se deben cumplir para que podamos estudiar ambos problemas de manera independiente son [10]:

- Materiales elásticos.
- Mismas propiedades de los cuerpos en contacto.
- Superficies lisas y sin fricción.
- Curvatura de los cuerpos cercana a la zona de contacto constante.
- Área de contacto pequeña.

Las dos últimas condiciones pueden no cumplirse en zonas de curvatura variable y menor radio como la zona base de la pestaña.

### **Contacto normal. Teoría de Hertz**

El cálculo de esta fuerza fue estudiado por Hertz en 1882 y su teoría es muy utilizada, dado que considera a los cuerpos en contacto como sólidos elásticos con geometría de curvatura constante en el contacto.

Mediante estas hipótesis llega a la conclusión de que la superficie de contacto es una superficie plana con forma de elipse y que la distribución de presiones es un semi-elipsoide.

Los sólidos penetran entre sí, por lo que se puede obtener un perfil de presiones, en función de la geometría de la elipse de contacto o de las características mecánicas, que permita calcular la fuerza normal de contacto [11].

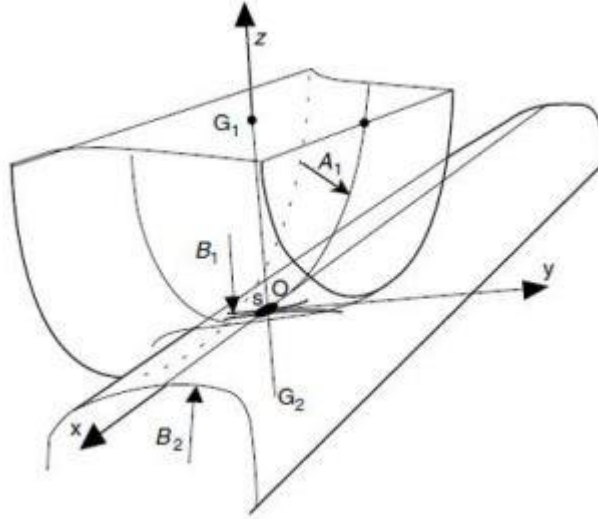


Fig. 12. Teoría de Hertz aplicada al contacto rueda-carril [10]

Para definir la superficie de contacto, es necesario calcular los semiejes de la elipse [10]:

$$a = m \cdot \left[ \frac{3\pi N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3} \quad (2.4.1)$$

$$b = n \cdot \left[ \frac{3\pi N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3} \quad (2.4.2)$$

Con:

$$K_1 = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi \cdot E_w} \quad (2.4.3)$$

$$K_2 = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi \cdot E_w} \quad (2.4.4)$$

$$K_3 = \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_w'} + \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R_R'} \right) \quad (2.4.5)$$

Donde:

$m, n$  = Coeficientes que dependen de  $\theta$

$N$  = Fuerza normal que actúa en el contacto

$\nu_i$  = Radio de curvatura de rueda (w) o rail (R)

$E_i$  = Módulo de Young de rueda (w) o rail (R)

$R_i$  = Radio de curvatura de la rueda (w) o del rail (R)

$R_i'$  = Radio de curvatura transversal de la rueda (w) o del rail (R)

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{K_4}{K_3} \right) \quad (2.4.6)$$

Siendo:

$$K_4 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_w'} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_w'} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_w'} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_w'} \right)^2 \cdot \cos 2\varphi \right] \quad (2.4.7)$$

$\varphi$  representa el ángulo que forman los planos que contienen a los radios de curvatura de rueda y rail.

Los coeficientes m y n toman diferentes valores dependiendo del ángulo  $\theta$ .

TABLA. 1: VALORES DE “m” Y “n” EN FUNCIÓN DE  $\theta$

$\theta$ (°)	m	n	$\theta$ (°)	m	n	$\theta$ (°)	m	n
0.5	61.4	0.1018	10	6.604	0.3112	60	1.486	0.717
1	36.89	0.1314	20	3.813	0.4123	65	1.378	0.759
1.5	27.48	0.1522	30	3.731	0.493	70	1.284	0.802
2	23.26	0.1691	35	3.397	0.530	75	1.202	0.846
3	16.5	0.1964	40	3.3136	0.567	80	1.128	0.893
4	13.31	0.2188	45	1.926	0.604	85	1.061	0.944
6	9.79	0.2552	50	1.754	0.641	90	1.000	1.000
8	7.86	0.285	55	1.611	0.678			

Posteriormente, Hertz aplicó la distribución de presiones en la elipse de contacto, de lo que resultaba:

$$p(x, y) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{x}{a} \right)^2 - \left( \frac{y}{b} \right)^2} \quad (2.4.8)$$

Una vez conocida esta distribución de presiones además del área de la elipse, definida por sus semiejes, se podía calcular la fuerza aplicada en el contacto [10]:

$$N = \frac{2\pi ab p_0}{3} \quad (2.4.9)$$

## Contacto tangencial. Teoría de Kalker

La obtención de este parámetro se basa en la teoría de Kalker, la cual relaciona las fuerzas tangenciales con el pseudodeslizamiento. Esta relación se basa en que si el pseudodeslizamiento es pequeño, casi toda la zona de contacto es zona de adhesión, siendo ínfima la zona de deslizamiento.

Para que se cumpla lo descrito anteriormente, esta teoría se basa en la de Hertz, además de suponer deslizamientos constantes en el centro de la elipse, coeficientes de Kalker constantes y que deformaciones locales dan lugar a fuerzas locales.

Kalker crea tres teorías para resolver el problema, y en dos de ellas divide el contacto en franjas independientes, utilizando para ello una división por cuadrículas. Utilizando este método de mallado, la geometría de cada elemento es distinta, con lo que se obtiene un mallado irregular (ver figura 11).

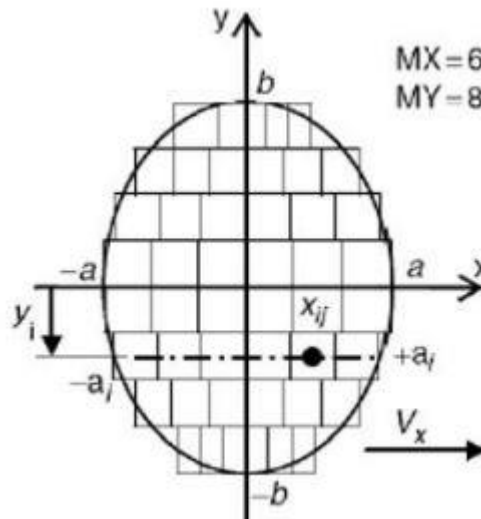


Fig. 13. Zona de contacto de Kalker [10]

Además de lo anterior, también calculó la distribución de presiones a lo largo de las direcciones x e y de la huella de contacto [10]:

$$p_x(x, y_i) = \frac{\varepsilon_x}{L_1} \cdot (x - a_i) - y_i \frac{\varphi}{L_3} \cdot (x - a_i) \quad (2.4.10)$$

$$p_y(x, y) = \frac{\varepsilon_y}{L_2} \cdot (x - a_i) + \frac{\varphi}{2L_3} \cdot (x^2 - a_i^2) \quad (2.4.11)$$

Con:

$$\varepsilon_x = \frac{\text{velocidad longitudinal real} - \text{velocidad de rodadura pura}}{\text{velocidad longitudinal debido a rodadura}} \quad (2.4.12)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\text{velocidad lateral real} - \text{velocidad lateral de rodadura pura}}{\text{velocidad lateral debido a rodadura}} \quad (2.4.13)$$

$$\varphi = \frac{\text{velocidad angular real del cuerpo superior} - \text{velocidad angular real del cuerpo inferior}}{\text{velocidad nominal de rodadura}} \quad (2.4.14)$$

En ambas fórmulas el primer término representa el desplazamiento longitudinal rígido medio, y el segundo el efecto de giro como un desplazamiento rígido local en el punto (x,y) de la franja.

A continuación, integrando ambas expresiones a lo largo del área de contacto se obtienen las fuerzas lineales de contacto:

$$F_x = - \int \int p_x(x) dx dy = - \frac{8a^2 b s_x}{3L_1} \quad (2.4.15)$$

$$F_y = - \int \int p_y(y) dx dy = - \frac{8a^2 b s_x}{3L_2} - \frac{\pi a^3 b \varphi}{4L_3} \quad (2.4.16)$$

Donde:

$$L_1 = \frac{8a}{3c_{11}G} \quad (2.4.17)$$

$$L_2 = \frac{8a}{3c_{22}G} \quad (2.4.18)$$

$$L_3 = \frac{\pi a \sqrt{\frac{a}{b}}}{4c_{23}G} \quad (2.4.19)$$

Siendo G el módulo de Poisson del material y  $c_{ij}$  los coeficientes de Kalker, los cuales se encuentran en función del valor de los semiejes de la elipse (ver figura 12).

		C <sub>11</sub>			C <sub>22</sub>			C <sub>23</sub> = -C <sub>32</sub>			C <sub>33</sub>		
g		$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2
0.0		$\pi^2/4(1 - \sigma)$			$\pi^2/4 = 2,47$			$\pi\sqrt{g}/3$	—	—	$\pi^2/16(1-\sigma)g$		
a/b	0.1	2.51	3.31	4.85	2.51	2.52	2.53	0.334	0.473	0.731	6.42	8.28	11.7
	0.2	2.59	3.37	4.81	2.59	2.63	2.66	0.483	0.603	0.809	3.46	4.27	5.66
	0.3	2.68	3.44	4.80	2.68	2.75	2.81	0.607	0.715	0.889	2.49	2.96	3.72
	0.4	2.78	3.53	4.82	2.78	2.88	2.98	0.720	0.823	0.977	2.02	2.32	2.77
	0.5	2.88	3.62	4.83	2.88	3.01	3.14	0.827	0.929	1.07	1.74	1.93	2.22
	0.6	2.98	3.72	4.91	2.98	3.14	3.31	0.930	1.03	1.18	1.56	1.68	1.86
	0.7	3.09	3.81	4.97	3.09	3.28	3.48	1.03	1.14	1.29	1.43	1.50	1.60
	0.8	3.19	3.91	5.05	3.19	3.41	3.65	1.13	1.25	1.40	1.34	1.37	1.42
	0.9	3.29	4.01	5.12	3.29	3.54	3.82	1.23	1.36	1.51	1.27	1.27	1.27
b/a	1.0	3.40	4.12	5.20	3.40	3.67	3.98	1.33	1.47	1.63	1.21	1.19	1.16
	0.9	3.51	4.22	5.30	3.51	3.81	4.16	1.44	1.59	1.77	1.16	1.11	1.06
	0.8	3.65	4.36	5.42	3.65	3.99	4.39	1.58	1.75	1.94	1.10	1.04	0.954
	0.7	3.82	4.54	5.58	3.82	4.21	4.67	1.76	1.95	2.18	1.05	0.965	0.852
	0.6	4.06	4.78	5.80	4.06	4.50	5.04	2.01	2.23	2.50	1.01	0.892	0.751
	0.5	4.37	5.10	6.11	4.37	4.90	5.56	2.35	2.62	2.96	0.958	0.819	0.650
	0.4	4.84	5.57	5.57	4.84	5.48	6.31	2.88	3.24	3.70	0.912	0.747	0.549
	0.3	5.57	6.34	7.34	5.57	6.40	7.51	3.79	4.32	5.01	0.868	0.674	0.446
	0.2	6.96	7.78	8.82	6.96	8.14	9.79	5.72	6.63	7.89	0.828	0.601	0.341
0.1	10.7	11.7	12.9	10.7	12.8	16.0	12.2	14.6	18.0	0.795	0.526	0.228	

Fig. 14. Coeficientes de Kalker en función de a y b

## Métodos de resolución

Kalker desarrolló una serie de técnicas para la resolución del problema de contacto, ya que la teoría descrita anteriormente no es válida cuando los pseudodeslizamientos son grandes.

Estos programas de cálculo son:

### ➤ CONTACT

Programa que integra la teoría exacta de Kalker y que resuelve el problema de contacto tangencial de forma tridimensional y no lineal. Este método aplica la teoría de la elasticidad junto con el tipo de contacto Hertziano.

Además, está orientado a la resolución exacta de problemas y por lo tanto no es precisa su utilización en los pasos individuales de la integración numérica.

### ➤ FASTSIM

Este método se basa en la teoría simplificada de Kalker y por lo tanto las principales hipótesis en las que se basa son menos exactas que en el anterior.

En él, se caracteriza la zona de contacto como una elipse constante que presenta una zona flexible entre ambos cuerpos rígidos y se considera que la relación entre las fuerzas de contacto tangenciales y los pseudodeslizamiento es lineal. Por todo ello esta metodología es la más utilizada hoy en día.

Junto a lo anterior, el método FASTSIM considera que los desplazamientos tangenciales en un punto, solo se relacionan con las tensiones tangenciales que actúan sobre el mismo, de la siguiente manera:

$$u_t(x, y) = L \cdot \sigma_t(x, y) \quad (2.4.20)$$

Siendo:

$u_t$ : Deslizamientos tangenciales en función de las coordenadas x e y

L: Coeficientes de flexibilidad

$\sigma_t$ : Tensiones tangenciales en función de las coordenadas x e y

Para llevar a cabo este cálculo se considera la división en franjas descrita anteriormente (ver figura 13).

Los deslizamientos se calculan partiendo desde el centro de la elipse, mientras que las fuerzas y presiones se calculan en el centro de cada cuadrícula, siendo la presión el valor del elipsoide en un punto determinado.

## 3. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

---

### 3.1 Sistemas multicuerpo

Se denomina de esta forma a todo conjuntos de sólidos rígidos o flexibles que se encuentran unidos entre sí por medio de uniones [12].

En la mayoría de este tipo de sistemas mecánicos, las ecuaciones que definen el movimiento de los mismos necesitan la ayuda de programas informáticos para ser resueltas con exactitud, y de esta manera conseguir un correcto cálculo y simulación de los mecanismos.

Este conjunto de ecuaciones rigen su cinemática y su dinámica, y constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales ordinales o algebraicas, en las que la formulación multicuerpo depende de las coordenadas elegidas para describir el sistema.

El estudio de la dinámica de estos sistemas multicuerpo ha generado numerosas formulaciones dentro del ámbito de la mecánica, las cuales derivan de otros sistemas de ecuaciones del movimiento, como las desarrolladas por Newton, Euler o Lagranje.

El desarrollo de una disciplina propia basada en la dinámica de los sistemas multicuerpo se consigue mediante los trabajos de Kurt Magnus y Jens Wittenburg durante los años 70.

A partir de este momento, la utilización del cálculo asistido por ordenador ha logrado numerosos avances en cuanto al desarrollo de métodos y algoritmos que permiten resolver el problema dinámico del sistema multicuerpo. Entre estos avances, el enfoque del problema mediante elementos finitos, y su resolución utilizando métodos matriciales, ha permitido resolver sistemas de gran complejidad, los cuales no podrían ser resueltos de manera clásica debido al elevado número de incógnitas y ecuaciones que implican [13].

Por otro lado, para definir correctamente el sistema es necesario definir claramente las uniones que existen entre los diferentes cuerpos, ya que pueden permitir o restringir el movimiento de alguno de los cuerpos en los seis grados de libertad [12].

### 3.2 Programas de simulación ferroviaria

Estos programas permiten simular diseños previamente creados para así estudiar diversos parámetros de interés con los que podemos obtener multitud de información. Debido a esto, son una gran herramienta para disminuir costes de fabricación o para mejorar la funcionalidad del elemento de una manera sencilla y rápida.

Un ejemplo de programas de este tipo es Simpack, un software de simulación multicuerpo que permite resolver modelos virtuales en 3D para visualizar el movimiento acoplando fuerzas y esfuerzos.



Es un programa muy utilizado en los sectores industriales de automoción, motor, ferrocarriles o energía eólica entre otros.

Simpack fue creado principalmente para manejar modelos complejos de cuerpos flexibles con contacto áspero y además es muy adecuado para llevar a cabo análisis transitorios de alta frecuencia [14].

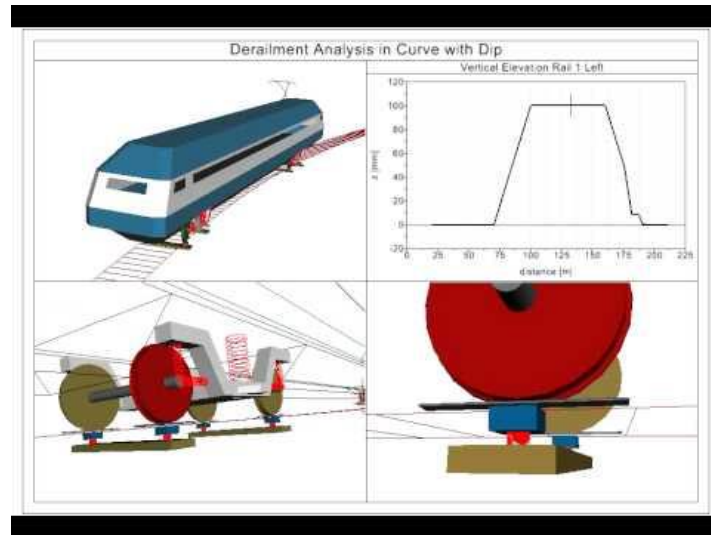


Fig. 15. Simpack [14]

Otro programa de simulación ferroviaria muy utilizado es el VAMPIRE; software que permite crear un modelo dinámico de cualquier vehículo ferroviario.

Posteriormente, permite estudiar la respuesta de dicho vehículo dependiendo de la geometría de la vía o de numerosas entradas especificadas por el usuario en forma de desplazamientos de la vía y entradas externas [15].

La simulación con este programa permite al usuario:

- Llevar a cabo análisis para refinar los diseños de los vehículos y los componentes clave de la infraestructura.
- Proporcionar una alternativa a las pruebas de aceptación.
- Permitir examinar aspectos del comportamiento del vehículo que no podrían realizarse de otra manera.

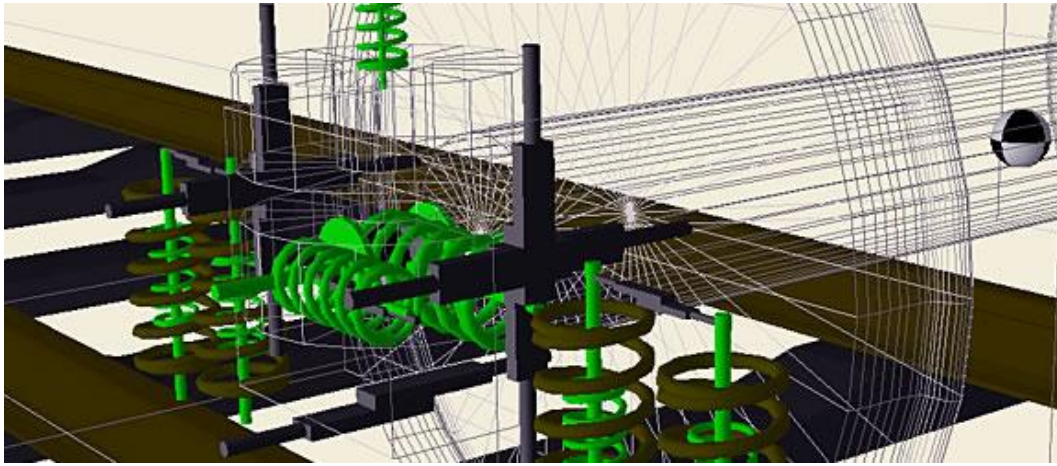


Fig. 16. Vampire [15]

Además de estos programas, es necesario destacar también el VI-Rail, que permite construir un modelo completo y parametrizado de un vehículo ferroviario, definir fácilmente su suspensión, juego de ruedas o el contacto con el carril.

A través de simulaciones, el software permite determinar la estabilidad del vehículo, la distancia para evitar el descarrilamiento, la carga a la que se somete la vía, etc. Junto a estos parámetros también permite detectar interferencias de componentes, desgaste excesivo, inestabilidad y limitaciones de rendimiento.

VI-Rail se basa en el producto MSC Software MSC Adams, el cual es ampliamente reconocido como la herramienta de simulación de sistemas mecánicos líder mundial [16].

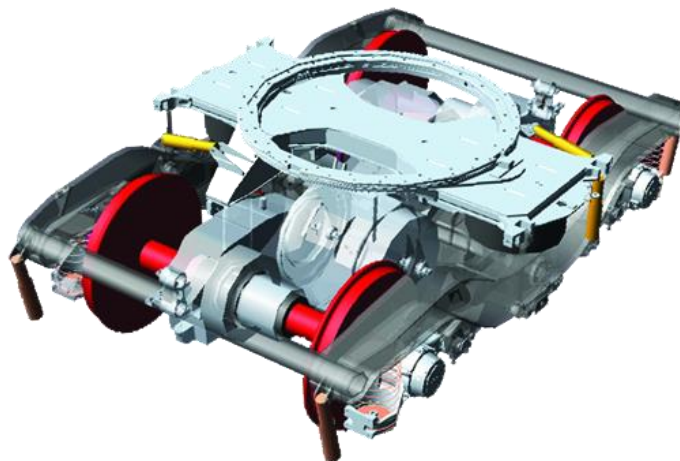


Fig. 17. VI-Rail [16]

### 3.3 Universal Mechanism

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado el programa informático Universal Mechanism basado en los programas CAE (Ingeniería asistida por ordenador).

Es un programa orientado al estudio de la dinámica de máquinas y mecanismos. Estos sistemas mecánicos se describen representándolos como sistemas de cuerpos rígidos conectados por varios pares cinemáticos y elementos de fuerza, también conocidos como sistemas multicuerpo [17].

Durante la simulación, se pueden obtener la línea del movimiento y gráficos de las actuaciones dinámicas del mecanismo a estudiar.

UM cuenta con posprocesador avanzado que incluye: análisis lineal, estadísticas, cálculo multivariante, desgaste y durabilidad, y análisis y exportación de resultados.

Por todo ello, este software es una herramienta útil para el modelado asistido por computadora de sistemas multicuerpo e híbridos de varios tipos: estructuras aeroespaciales, robots, vehículos ferroviarios, automóviles, etc.

Este software se divide en diferentes paquetes, dependiendo del uso que le queramos dar utilizaremos uno u otro. En este caso se ha utilizado el UM Loco, que está destinado al estudio y simulación de la dinámica de los vehículos ferroviarios en diferentes condiciones de circulación.

Esta simulación se realiza en el dominio del tiempo por medio de la integración numérica de las ecuaciones diferenciales o algebraicas del movimiento. UM Loco permite al usuario crear modelos totalmente parametrizados con los que se consigue un análisis efectivo junto a una optimización de su comportamiento dinámico.

Además, permite introducir modelos de cuerpos flexibles importados de ANSYS o NASTRAN para así obtener una solución más precisa.

UM permite al usuario llevar a cabo una serie de tareas como:

- Calcular la velocidad crítica
- Analizar la dinámica 3D de un vehículo ferroviario en función del tiempo en vías rectas o curvas con o sin irregularidades.
- Analizar la dinámica del vehículo en función de los perfiles de ruedas y railes.
- Crear proyectos multivariantes para escanear la dinámica del vehículo en función de cualquier parámetro.
- Calcular frecuencias y modos naturales.
- Crear modelos híbridos rígidos elásticos de vehículos.
- Realizar un análisis de durabilidad de partes de vehículos.

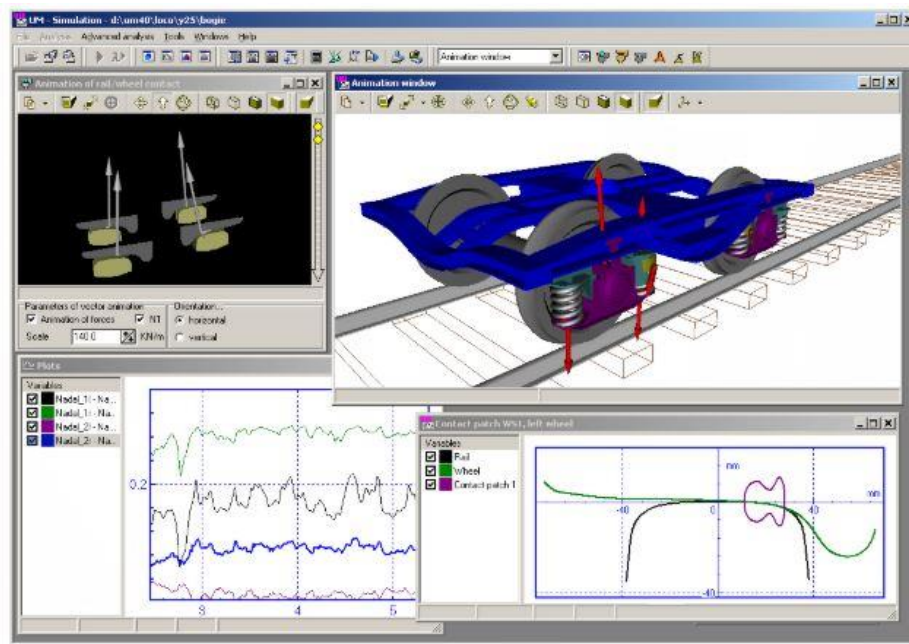


Fig. 18. Universal Mechanism [17]

Antes de comenzar a describir el proceso llevado a cabo es necesario comentar los diferentes módulos en los que se divide el UM Loco, uno utilizado para diseñar el modelo y el otro para simularlo.

## **Módulo Input**

En él se realiza la creación geométrica del mecanismo que deseemos estudiar además de permitir importar un modelo ya creado desde la biblioteca de elementos o desde otros programas.

Esta sección del UM nos permite trabajar con varios modelos a la vez, lo que ofrece más posibilidades a la hora de realizar nuestros estudios.

Lo primero que nos aparece al abrir dicho módulo es lo mostrado en la figura 19, donde podemos diferenciar cuatro partes principales [17]:

1. Árbol de elementos: situado en la esquina superior izquierda de la pantalla, se utiliza para acceder a los diferentes elementos que componen el modelo.
2. Ventana de animación: situada en el centro, muestra el modelo completo o sus elementos individualmente. En ella se puede observar la identificación por ejes: Rojo – X, Verde – Y y Azul – Z. Además, diferentes parámetros como el zoom o la rotación, pueden ser variados utilizando la barra de herramientas.

3. Inspector de objetos: situado en la parte derecha de esta sección, es la herramienta principal en la descripción de los elementos. Muestra parámetros de un elemento activo y contiene toda la información del mismo.
4. Lista de parámetros: se encuentra en la parte inferior izquierda y es básicamente una tabla donde el usuario puede incluir los parámetros que sea necesario variar frecuentemente.

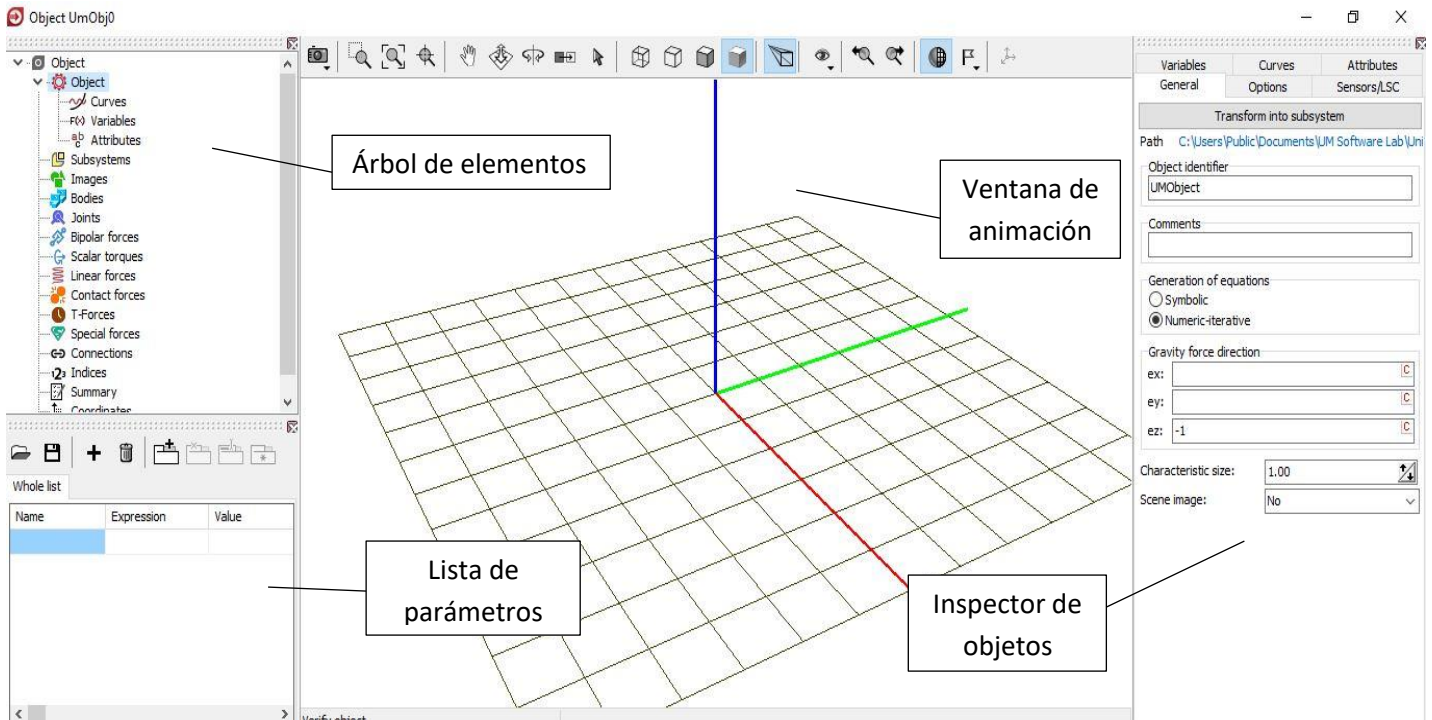


Fig. 19. Módulo Input

## Módulo Output

Esta sección del UM carga las ecuaciones de movimiento del modelo que hayamos creado o exportado de la biblioteca de elementos.

De esta forma, se lleva a cabo un análisis numérico de las ecuaciones de movimiento que incluye:

- Integración numérica de las ecuaciones de movimiento.
- Cálculo de equilibrio y análisis lineal.

Una vez realizada esta simulación, la cual puede visualizarse utilizando la ventana de animación del modelo, el módulo permite al usuario analizar los resultados mediante gráficas.

Debido a la multitud de opciones que presenta este módulo, solo se van a explicar aquellas utilizadas en la simulación del banco de rodillos sobre el que versa el proyecto.



Una vez abierto el módulo *output*, el usuario debe utilizar la barra de herramientas superior para acceder a cada una de las diferentes ventanas (ver figura 20).

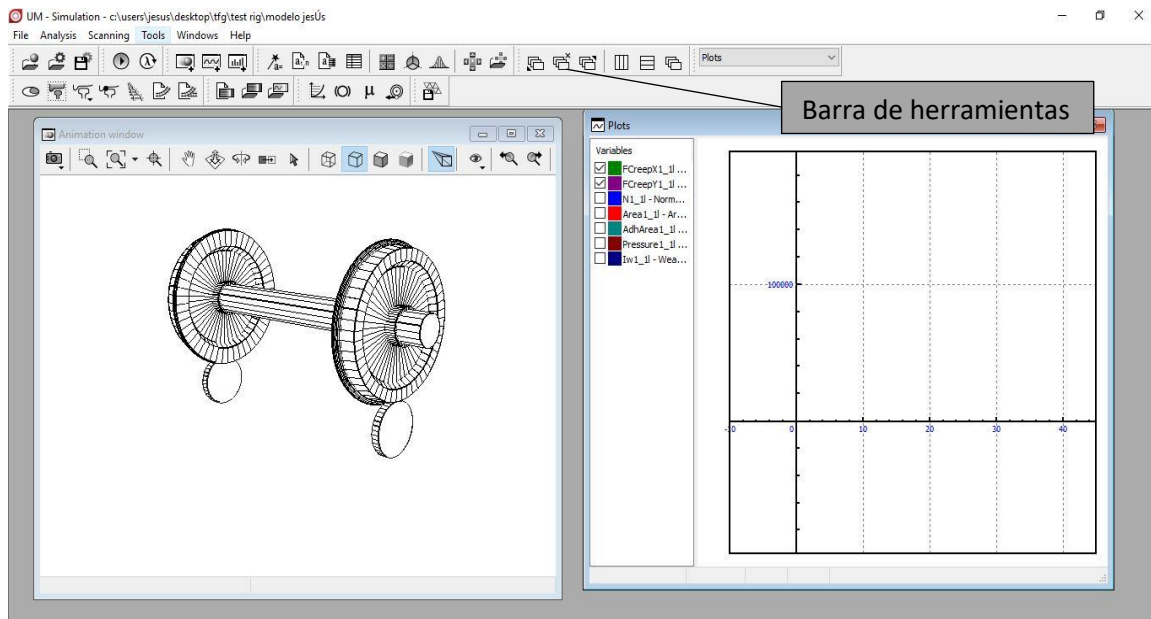


Fig. 20. Módulo Output

La primera ventana importante es “*Static and linear analysis*” (ver figura 21) a la que se accede desde el botón situado en la barra de herramienta “*Analysis*”, ya que en ella se pueden definir numerosos parámetros referentes a frecuencias, vibraciones o condiciones iniciales de funcionamiento como la velocidad.

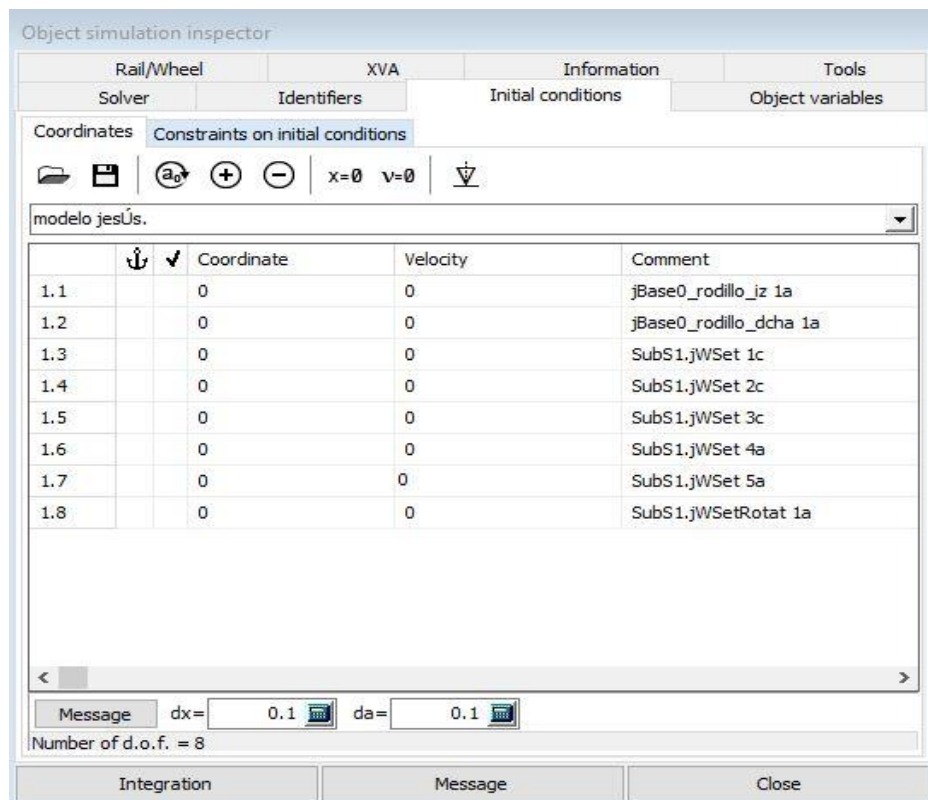


Fig. 21. Inspector de simulación. Condiciones iniciales del modelo

Por otro lado, clicando en “*Analysis*” y seguidamente a “*Simulation*” se abre el inspector de simulación (ver figura 22), desde el cual también se puede acceder a lo mostrado en la figura 21.

Esta ventana permite acceder a diferentes parámetros sobre los que se basa la simulación del modelo, como el tiempo de simulación, el error cometido o el método de resolución.

Además de lo anterior, también permite definir condiciones del contacto rueda carril, como el perfil de las ruedas y del carril, el tipo de contacto o el defecto en las ruedas entre otros.

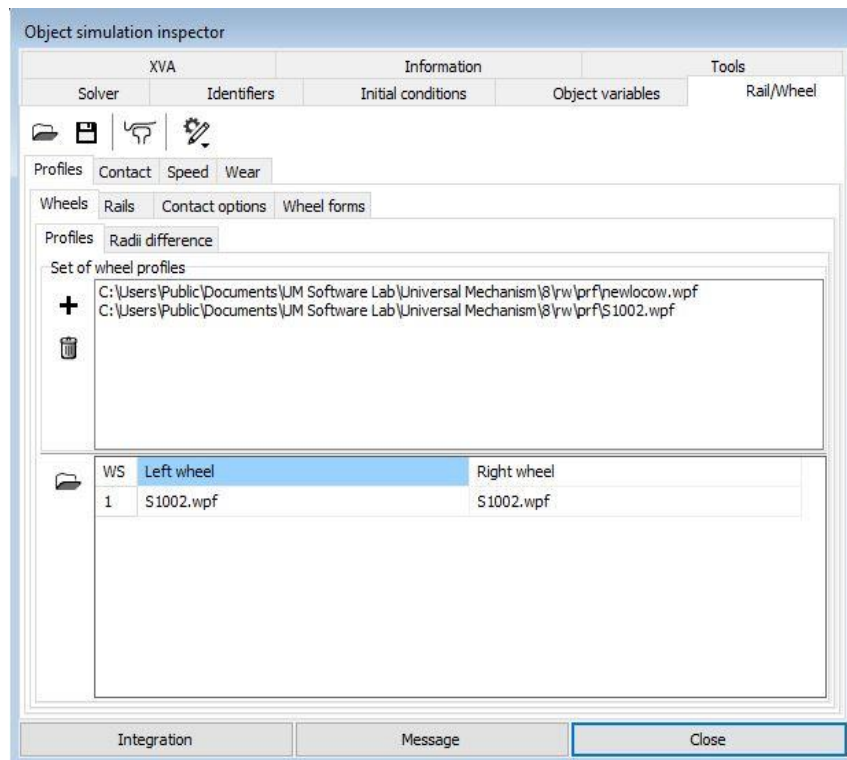


Fig. 22. Inspector de simulación. Condiciones rueda/carril

Otra ventana importante es la ventana de animación (ver figura 23) en la cual se puede visualizar la simulación real del sólido rígido a estudiar.

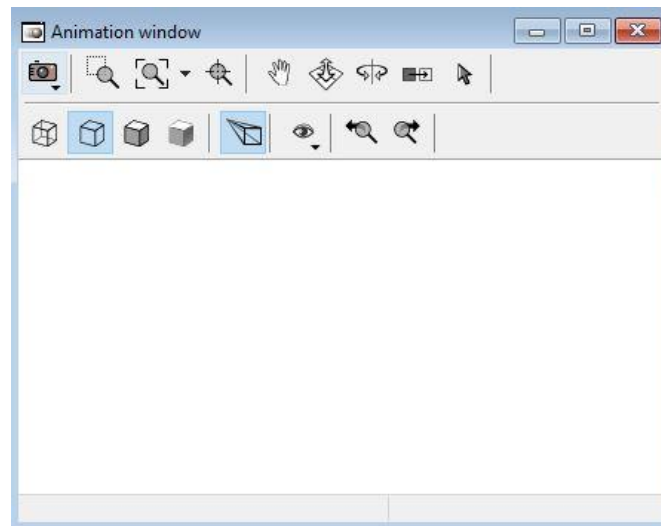


Fig. 23. Ventana de animación

Realizada la simulación, el siguiente paso es seleccionar y analizar los parámetros a estudio para lo cual el módulo *Output* dispone de una serie de ventanas que permiten dicha selección.

La primera que es necesario utilizar es “*Wizard of variables*” (ver figura 24) ya que nos presenta todas las variables que el programa permite estudiar, como pueden ser: velocidades angulares y lineales, trayectorias, momentos, fuerzas, aquellas relacionadas con el contacto rueda-carril, etc. Pudiendo ser todas ellas calculadas en diferentes puntos de interés del sistema multicuerpo.



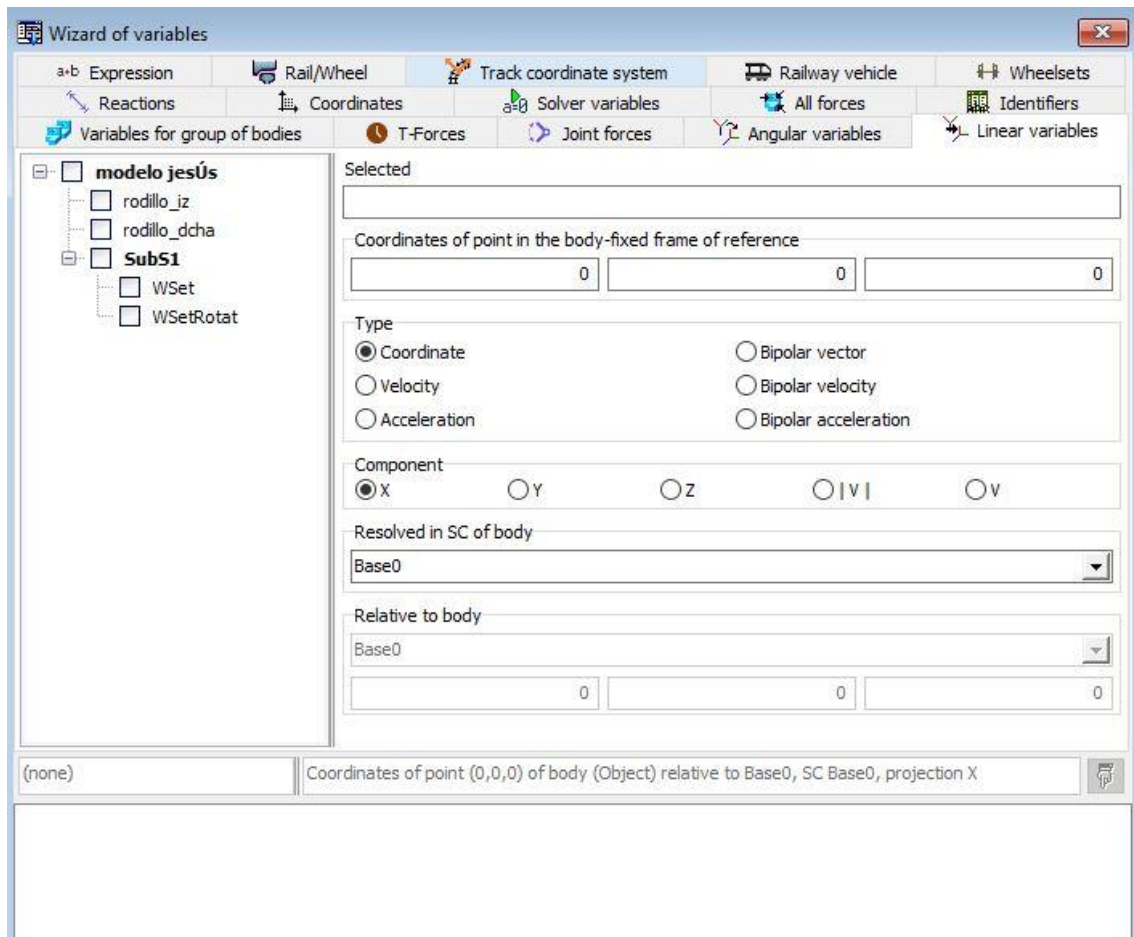


Fig. 24. Wizard of variables

Una vez seleccionadas las que son de utilidad, estas se arrastran a la ventana gráfica (ver figura 25), a la cual se llega clicando el botón “*tools*” de la barra de herramientas y seguidamente “*graphical window*”.

Esta ventana muestra en una gráfica las diferentes variables que se desean estudiar en función del tiempo de simulación, lo que permite al usuario analizar los resultados de una manera más visual.

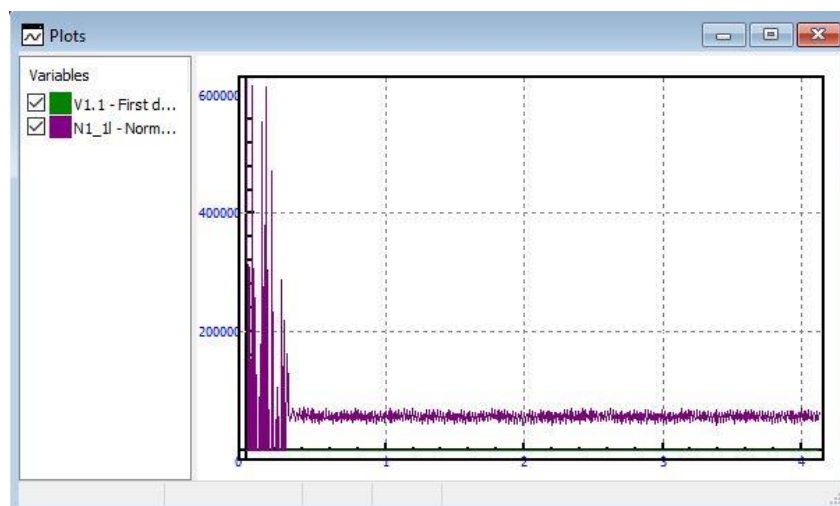


Fig. 25. Ventana gráfica

Junto a lo comentado anteriormente el módulo *Output* de UM presenta la posibilidad de exportar las gráficas y datos obtenidos a otros programas como Excel o Matlab, donde pueden ser estudiados de una forma más precisa.

## 4. METODOLOGÍA

---

### 4.1 Antecedentes

Como ya se comentó anteriormente, el sector ferroviario se encuentra en continuo crecimiento, y dentro del mismo España goza de una gran posición en cuanto a diseños y proyectos de gran calibre.

Debido a esto, se necesita una mejora continua tanto de las medidas de seguridad como de las pruebas de funcionamiento donde se analizan las diferentes condiciones de circulación.

Todo ello da lugar a que, debido a la imposibilidad de estudiar de forma precisa el contacto rueda-rail, surjan diferentes empresas especializadas en la fabricación de bancos de ensayos en los cuales se simula la circulación en vía sobre rodillos.

Junto a estos ensayos, se presenta la necesidad de utilizar diferentes métodos de resolución matemática con los que se podrán analizar numerosas variables referentes al contacto entre ambos cuerpos en función de la geometría y de las condiciones de contorno establecidas. [18]

De esta forma, el objetivo principal de estos bancos de ensayo es obtener la relación directa que existe entre los pseudodeslizamientos y los esfuerzos que se originan en la superficie de contacto para una velocidad de desplazamiento determinada.

### 4.2 Normativa aplicable

El sector ferroviario es uno de los más controlados tanto a nivel nacional como internacional. Esto se debe al gran volumen de servicio que presta y a las graves consecuencias que un fallo en cualquiera de sus partes (infraestructura, vehículo, etc) podría dar lugar.

Por lo tanto, es lógico que exista una estricta legislación que regule su creación y funcionamiento.

El objeto de estas leyes es por tanto “la regulación, en el ámbito de la competencia del Estado, de las infraestructuras ferroviarias, de la seguridad en la circulación ferroviaria y de la prestación de los servicios de transporte ferroviario de pasajeros y de mercancías.” [19]

Los fines que persigue esta ley son los estipulados en el art. 2 de la CE:

- a) “Garantizar un sistema común de transporte ferroviario en el territorio del Estado.”
- b) “Satisfacer las necesidades de la sociedad en el ámbito ferroviario.”
- c) “Facilitar el desarrollo de la política europea común de transporte ferroviario.”
- d) “Determinar las pautas para coordinar las actuaciones de los distintos órganos de las administraciones públicas.”
- e) “Separar el régimen jurídico aplicable a las infraestructuras ferroviarias del de los servicios de transporte.”
- f) “Regular la construcción de infraestructuras ferroviarias y el desarrollo de nuevos servicios de transporte de competencia estatal e impulsar la cohesión territorial, económica y social.”
- g) “Asegurar la eficiencia del sistema ferroviario estatal mediante una adecuada utilización de los recursos disponibles.”
- h) “Regular el sistema de otorgamiento de licencias que permitan el acceso al mercado de las empresas ferroviarias.”
- i) “Regular el acceso a la infraestructura ferroviaria.”
- j) “Promover las condiciones de competencia en la prestación de servicios de transporte ferroviarios.”
- k) “Establecer los criterios para que la prestación de los servicios de transporte ferroviario de viajeros y de mercancías se realice con eficacia, continuidad y en condiciones idóneas de seguridad.”
- l) “Promover la prestación de servicios ferroviarios en condiciones de seguridad, definir las responsabilidades que en dicha materia incumben a todos los agentes que operan en la Red Ferroviaria de Interés General y determinar las atribuciones de la autoridad nacional responsable de la seguridad ferroviaria.”
- m) “Regular la investigación de accidentes e incidentes ferroviarios y las facultades y normas de funcionamiento de la Comisión de investigación de accidentes ferroviarios.”
- n) “Proteger los intereses de los usuarios, con atención especial a las personas con discapacidad o con movilidad reducida.”

A continuación se presentan las normas más significativas dentro de la normativa española UNE, referentes al tema tratado en el proyecto.

- “UNE-EN ISO 12100:2012; Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.” [20]
- “UNE-EN 50153:2014; Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Medidas de protección relativas a riesgos eléctricos.” [21]
- “UNE-EN 61373:2011; Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Ensayos de choque y vibración.” [22]
- “UNE-EN 14363:2017; Aplicaciones ferroviarias. Ensayos y simulaciones para la aceptación de las características dinámicas de los vehículos ferroviarios. Comportamiento dinámico y ensayos estáticos.” [23]
- “UNE-EN 12299:2010; Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros. Medición y evaluación.” [24]
- “UNE-EN 13261:2009+A1:2011; Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ejes. Requisitos de producto.” [25]
- “UNE-EN 13715:2007+A1:2011; Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Perfil de rodadura.” [26]
- “UNE-EN 13262:2005+A2:2011; Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Requisito de producto.” [27]
- “UNE-EN 50215:2011; Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Ensayos del material rodante al término de su construcción y antes de su puesta en servicio.” [28]
- “UNE-EN 12663-1:2011+A1:2015; Aplicaciones ferroviarias. Requisitos estructurales de las cajas de los vehículos ferroviarios. Parte 1: Locomotoras y material rodante de viajeros (y método alternativo para vagones de mercancías).” [29]
- “UNE-EN 13749:2012; Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Métodos para especificar los requisitos estructurales de los bastidores de bogie.” [30]

## 4.3 Creación y simulación del modelo

En este apartado se va a describir el proceso llevado a cabo para la creación del modelo en el módulo *Input* de UM, su posterior simulación en el módulo *Output* y el método de trabajo con los resultados obtenidos.

### Creación del modelo

El primer paso para crear el sistema multicuerpo es seleccionar el subsistema con el que se quiere trabajar (tipo *wheelset*), el método de ensayo (*test rig*) y los parámetros geométricos (radio de rueda, semibase, masa, momentos de inercia, etc.) (ver figura 26).

Fig. 26. Condiciones del wheelset

A continuación, se crean los rodillos sobre los que el eje calado va a girar. Estos cuerpos se implementan a partir de una imagen tipo cono, cuyas medidas se definen adecuadamente para crear un cilindro de pequeño espesor.

Como se puede observar en la figura 27, se definen en esta ventana auxiliar las medidas geométricas de los rodillos: radio y espesor.

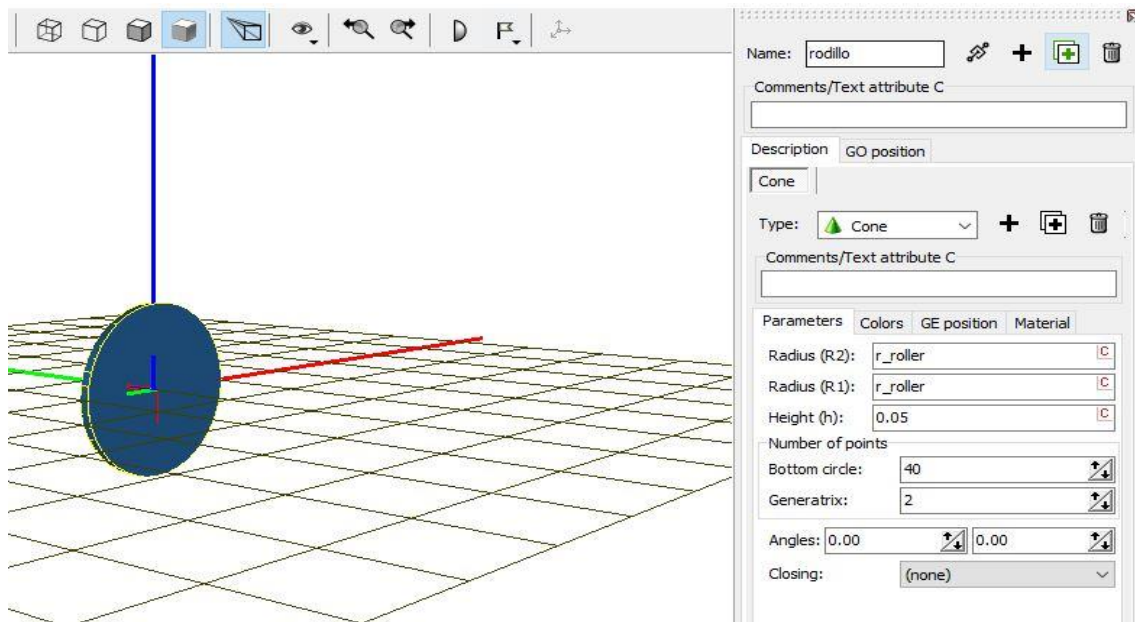


Fig. 27. Geometría del rodillo

Seguidamente, se crean dos cuerpos independientes a partir de esta imagen y se definen las coordenadas precisas para que contacten con el *wheelset*.

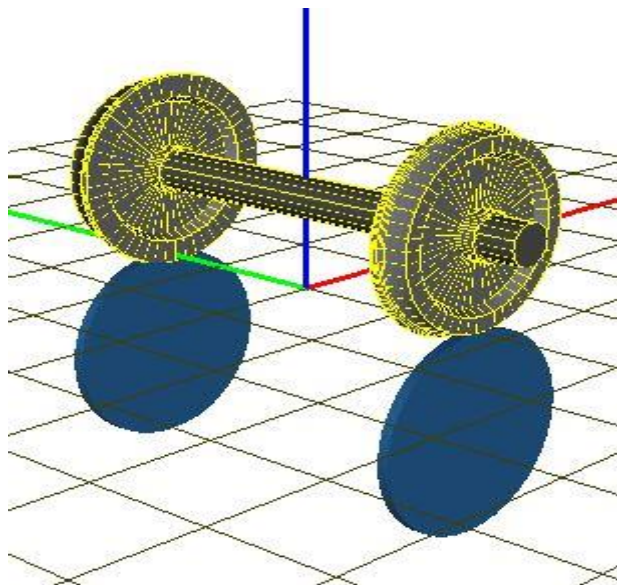


Fig. 28. Wheelset sobre rodillos

Una vez definida la posición geométrica de los cuerpos, se crea el sistema de referencia sobre el cual van a girar los rodillos (ver figura 29), al que el programa llama “*Base 0*”.

Este paso es muy importante ya que garantiza que todos los cuerpos giran sobre la posición correcta.

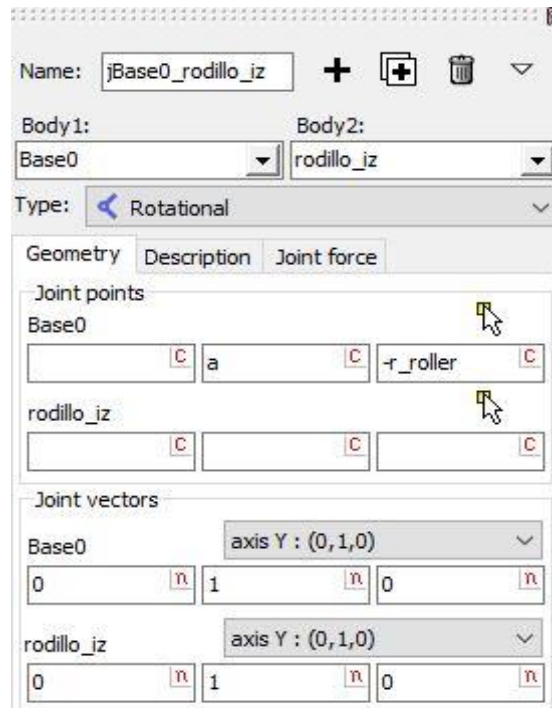


Fig. 29. Selección de eje de giro de los rodillos

Cuando el modelo queda creado geométricamente, el siguiente paso, es definir la fuerza y velocidad.

La fuerza a la que va a estar sometido el *wheelset* representa la carga que soporta un eje de un vehículo ferroviario común, y para que simule esta acción primero se selecciona “*T-Forces*” en el árbol de elementos.

Una vez hecho esto se abre una ventana para seleccionar las condiciones de dicho esfuerzo (ver figura 30).

En ella, se define la parte central del *wheelset* y el eje negativo de z, como la zona y el sentido de actuación de esta variable respectivamente.



Name: GFrc1

Comments/Text attribute C

Body1: SubS1.WSet Body2: Base0

Reference frame: Base0

Reduction point : Base0

0 0 0

Type of description  
☒ Expression ☐ File

Force:  
 0  
 0  
 fvertical

Moment:

T= 10 dT= 0.01

Fig. 30. Selección de la fuerza que soporta el wheelset

Por último, dentro de este módulo es necesario comentar que los parámetros que posteriormente serán variados para realizar las simulaciones en diferentes condiciones ( $r_{roller}$ ,  $v0$  y  $fvertical$ ), han sido incluidos dentro de la lista de parámetros.

Esto permite variarlos de manera más rápida y sencilla al estar todos incluidos dentro de una misma ventana (ver figura 31).

Name	Expression	Value
v0	25	
a	$1.435/2+0.07+0.0$	0.8515
Rrueda	$0.92/2$	0.46
r_roller	0.5	
fvertical	$25000*9.8$	$2.4500000E+5$

Fig. 31. Lista de parámetros

Cuando el sistema multicuerpo queda definido se exporta este al módulo *Output*, donde se van a realizar las simulaciones y de donde se obtienen los resultados de las mismas.

## Simulación del modelo

Llegados a este punto, el primer paso que hay que realizar antes de comenzar la simulación del modelo, es definir la velocidad angular de los rodillos, para que así el giro de estos se adecúe a la velocidad lineal impuesta en el *wheelset*.

Esto se edita desde el inspector de simulación dentro de la pestaña de condiciones iniciales.

Cabe destacar que esta velocidad angular depende del radio de los rodillos y de la velocidad lineal del eje calado, y además, ha de ser negativa ya que el giro de los rodillos es contrario al giro del *wheelset* (ver figura 32).

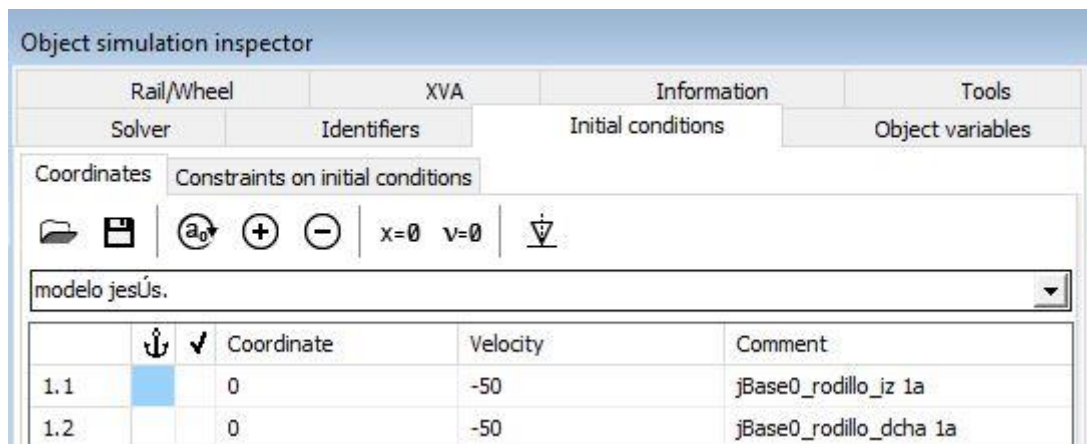


Fig. 32. Edición de la velocidad angular de los rodillos

Además de lo anterior, dentro de esta misma ventana se encuentra la pestaña donde se varían las diferentes variables en cada simulación (ver figura 33).

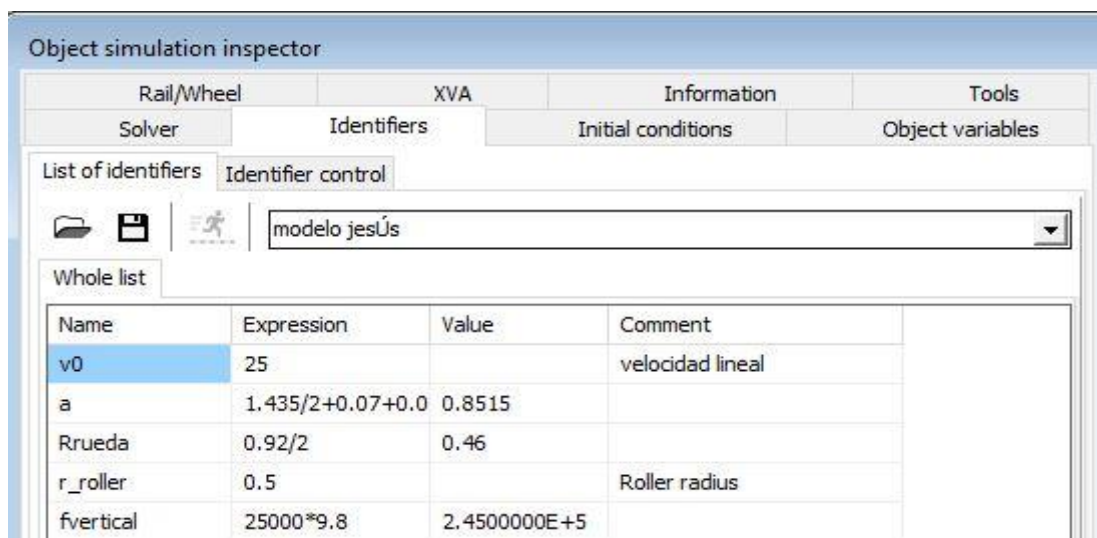


Fig. 33. Pestaña de variación de parámetros del modelo

Cuando ya se tienen definidos todos los parámetros del modelo correctamente, se procede a seleccionar las variables que son de interés estudiar.

En este proyecto se han seleccionado las siguientes:

- Fxcreep
- Fycreep
- Fuerza Normal
- Presión
- Área de contacto rueda-rodillo
- Área de adhesión rueda-rodillo
- Wear Index

Para visualizar su variación a lo largo del tiempo de simulación se extraen dichas variables de la ventana “*Wizard of Variables*” (ver figura 34), para a continuación adjuntarlas a la ventana “*Plots*” donde podrán analizarse gráficamente (ver figura 35).

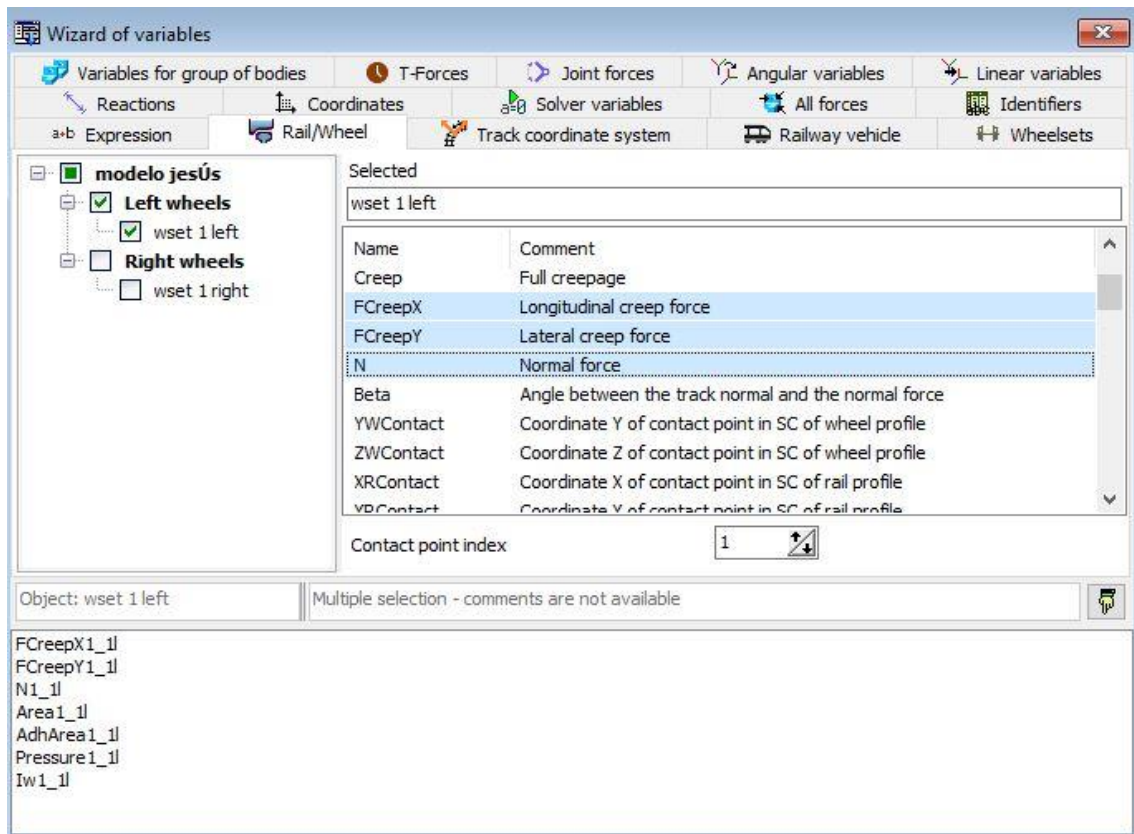


Fig. 34. Selección de variables a estudio

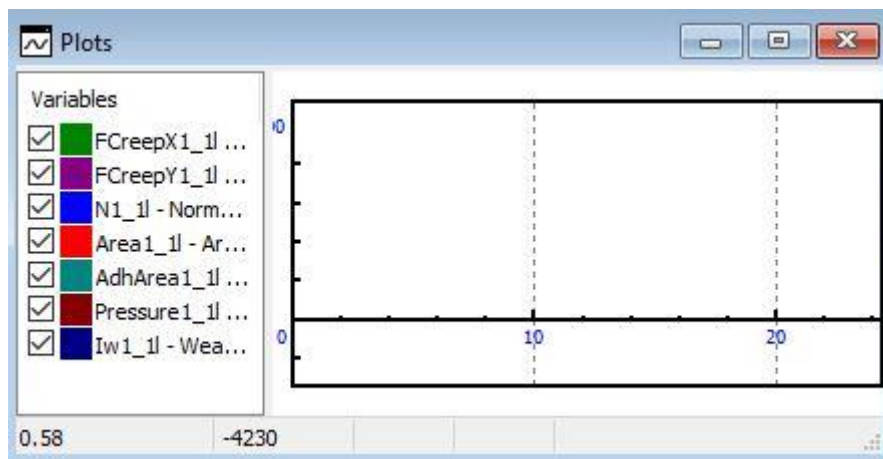


Fig. 35. Ventana de gráficas de las variables

Cabe destacar, que todas las variables se han estudiado en la rueda izquierda del *wheelset*, ya que no existe diferencia alguna entre los resultados de ambas ruedas.

A continuación, se define el tiempo de simulación y el método de integración del modelo dentro de la pestaña “*Solver*” del simulador de objetos (ver figura 36).

En este proyecto se ha elegido un tiempo de simulación de 20 segundos para todas las simulaciones y se han mantenido los demás parámetros por defecto.

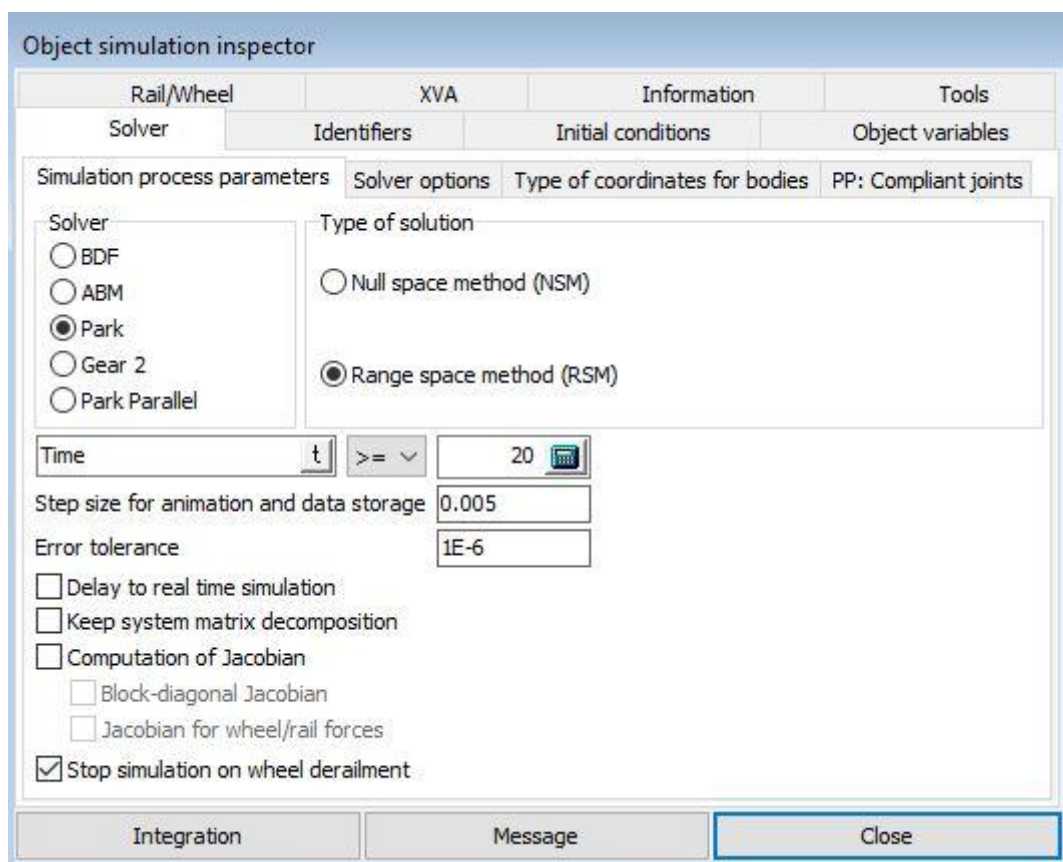


Fig. 36. Selección de condiciones de simulación

Por último, se clicca en el botón “*Integration*” para llevar a cabo la simulación y una vez concluida, se obtienen las gráficas de cada variable en función del tiempo (ver figura 37).

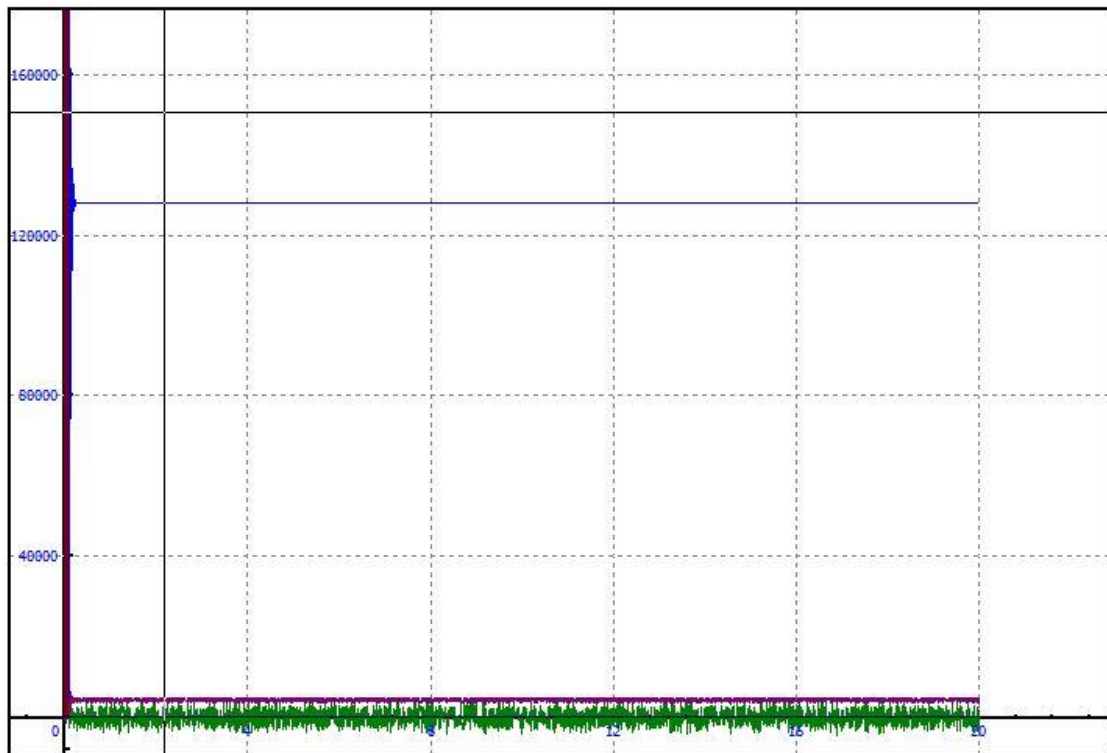


Fig. 37. Gráficas obtenidas de la simulación

Para cada velocidad se realizan 35 simulaciones, que corresponden a cinco simulaciones de carga sobre el *wheelset*, repetidas todas ellas con los seis radios de rodillo seleccionados, además de un radio infinito adicional representado como circulación sobre vía.

## **Exportación y tratamiento de resultados**

En este apartado se va a comentar el método para exportar los datos a Excel y su posterior tratamiento para obtener gráficas que muestren la influencia de la carga, el radio del rodillo y la velocidad en las variables elegidas.

Concluida la simulación, seleccionando todas las variables y dando click derecho aparece la opción de exportar los datos obtenidos a MS Excel.

Seleccionando dicha opción se abre un libro en Excel con las medidas de cada variable en función del tiempo (ver figura 35).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	X-values	F <sub>Creep</sub> X1_1l		F <sub>Creep</sub> Y1_1l		N1_1l		Area1_1l		AdhArea1_1l		Pressure1_1l		lw1_1l
2	0	35545.3047		13736.9941		614193.625		0.00022734		0.00020872		5584323072		0.17563476
3	0.00521875	5.07462931		1792.55286		16476.2148		1.8806E-05		1.5588E-05		1713312768		0.05550532
4	0.01009375	0		0		0		0		0		0		0
5	0.01509375	0		0		0		0		0		0		0
6	0.02009375	-218.068298		-1346.74219		29498.0898		2.8334E-05		2.5351E-05		2102739072		0.03475225
7	0.02509375	2305.75757		8866.11523		507903.531		0.00019847		0.0001896		5276192768		0.0177049
8	0.03009375	-25.7779922		16305.0137		276503.781		0.00012882		0.00012077		4376862208		0.04228842
9	0.03521875	13.4495544		1681.26428		18723.5254		2.0584E-05		1.8234E-05		1794020096		0.0329356
10	0.04021875	0		0		0		0		0		0		0
11	0.04509375	0		0		0		0		0		0		0
12	0.05009375	0		0		0		0		0		0		0
13	0.05521875	0		0		0		0		0		0		0
14	0.06021875	0		0		0		0		0		0		0
15	0.06509375	0		0		0		0		0		0		0
16	0.07009375	0.33752567		-60.1299629		759.69519		2.45E-06		2.0686E-06		621632128		0.00790046
17	0.07509375	0.21006365		-66.4476242		1222.99255		3.3557E-06		3.0019E-06		730433408		0.00563958
18	0.08009375	-1.28871751		-12.5275774		159.146301		8.0895E-07		7.2778E-07		383015776		0.00297596
19	0.08509375	22.2466145		-3.98781586		426.308868		1.6654E-06		1.5535E-06		513588544		0.00178966
20	0.09009375	1.96410215		335.091339		7137.73779		1.0927E-05		1.0451E-05		1307706496		0.00142832
21	0.09509375	-34.9591713		2246.1853		43996.4336		3.6885E-05		3.4697E-05		2399474688		0.00711276
22	0.10009375	44.0265274		6111.31348		119957.875		7.2363E-05		6.8021E-05		3349883648		0.01348246
23	0.10509375	683.102234		8713.22949		194456.953		0.00010088		9.6123E-05		3918278400		0.0121306

Fig. 38. Resultados de la simulación en MS Excel

Los resultados obtenidos dependen del tiempo de simulación seleccionado y en este caso un tiempo de 20 segundos proporciona 4000 valores para cada variable.

Una vez obtenida esta gran cantidad de datos, el primer paso es seleccionar el rango donde los parámetros se estabilizan, excluyendo los primeros momentos de la simulación donde los valores son muy dispares.

A continuación, se obtiene el valor medio de cada variable en el rango de datos seleccionado para así facilitar su tratamiento posteriormente.

Para ello se utiliza la fórmula de RMS, la cual permite obtener una media de valor absoluto de un conjunto de datos positivos y negativos cuya expresión viene dada por:

$$RMS = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2}{n}} \quad (4.3.1)$$

Una vez obtenido este valor para cada variable en todas las simulaciones, se agrupan los mismos en tablas para cada radio de rodillo y carga en el eje.

De esta forma se obtienen unas gráficas que muestran la evolución de cada parámetro respecto al aumento de radio y carga para cada una de las velocidades (ver figura 36) y una vez obtenidas, se implementan todas ellas en un gráfico 3D que muestre dicha evolución en función de los tres parámetros al mismo tiempo (ver figura 37).

	Wear index				
Radio	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	0.015704919	0.022683693	0.026837394	0.064817838	0.050202893
0.25	0.009606405	0.012522287	0.025769926	0.028548573	0.032657266
0.5	0.005642387	0.008523878	0.008733495	0.033572871	0.024423425
0.75	0.005731555	0.011671782	0.033068633	0.021951674	0.023553933
1	0.002471387	0.008546047	0.014556689	0.011620626	0.042217108
1.25	0.001668609	0.006599576	0.007501145	0.004177262	0.009485792
3	0.007169654	0.010047231	0.012748548	0.014681588	0.017300953

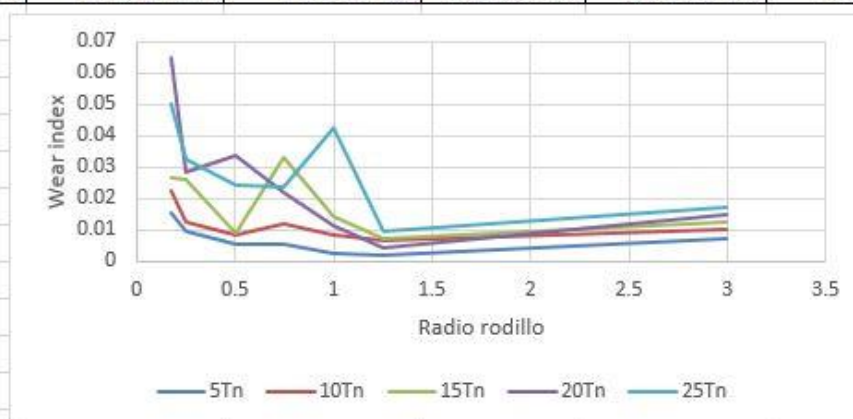


Fig. 39. Gráfica de cada variable para una velocidad en función de radio y carga

## **Análisis de resultados**

Una vez tratados los datos y obtenidos los métodos de representación gráfica de ellos, se comienza con el análisis de los resultados para así obtener conclusiones sobre el método de estudio del banco de rodillos recreado en este proyecto.

A continuación se presenta el esquema de proceso llevado a cabo en la obtención de resultados.

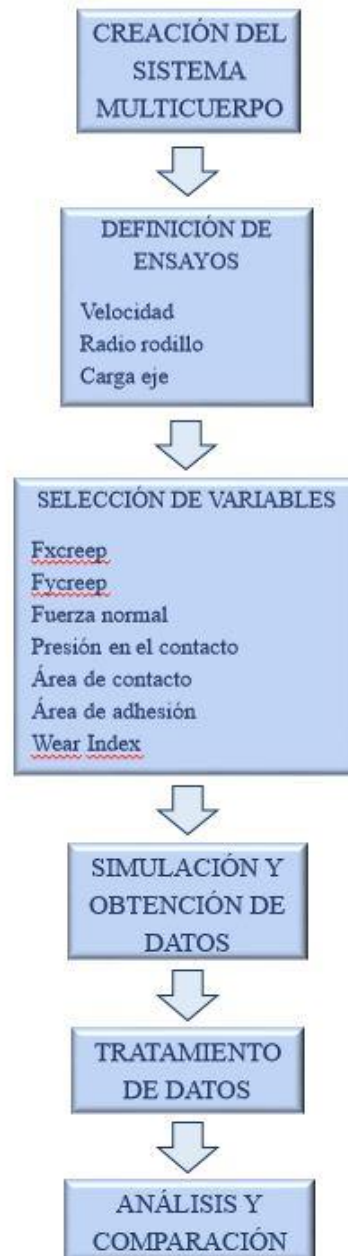


Fig. 40. Esquema de proceso



## 5. DESARROLLO DEL PROYECTO Y RESULTADOS

En este apartado del proyecto se exponen todos los resultados obtenidos del procesado en Excel de los datos generados de las simulaciones en el programa Universal Mechanism.

Antes de comenzar con el análisis de los datos, es necesario comentar que la condición de circulación en vía se ha representado en las tablas y gráficos como “R=3 m” debido a la imposibilidad de graficar números reales junto al infinito.

### 5.1 Análisis de las variables para cada velocidad

A continuación se muestran las gráficas obtenidas en Excel sobre la evolución de las diferentes variables a estudiar, para cada una de las velocidades.

#### 1) $V = 5 \text{ m/s}$

- Fxcreep**

TABLA. 2: FXCREEP PARA  $V=5 \text{ m/s}$

	Fxcreep (N)				
Radio (m)	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	5233.122803	4897.97498	11931.07463	22100.83615	13181.45758
<b>0.25</b>	2342.997163	8301.800252	17882.43941	10409.34863	7924.690314
<b>0.5</b>	5774.360589	5658.354576	13792.07109	23042.11805	30698.97664
<b>0.75</b>	3011.624464	8813.773225	18039.93148	12760.58498	16386.54205
<b>1</b>	5029.978139	5934.468377	11245.87707	21556.30567	29814.03823
<b>1.25</b>	3529.415215	5154.156342	6316.985802	14797.94737	25487.35254
<b>3</b>	2072.714188	3667.934821	5330.1882	10426.49031	16694.46778

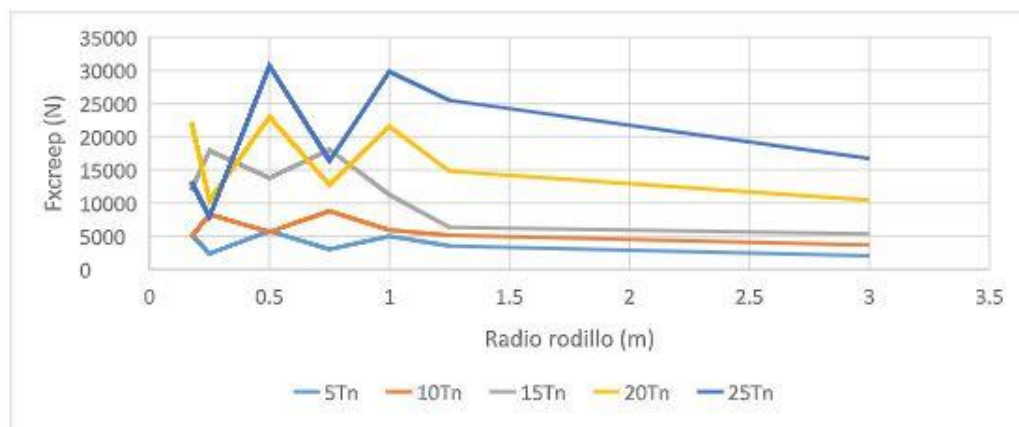


Fig. 41. Evolución de Fxcreep para  $V=5 \text{ m/s}$

Como se puede apreciar en la figura 41, para esta baja velocidad los valores de  $F_{xcreep}$  resultan muy dispares para todas las cargas y radio de rodillo, estabilizándose en cierta medida para  $R=3$  que representa circulación por vía.

- **Fycreep**

TABLA. 3: FYCREEP PARA  $V=5$  m/s

Radio (m)	Fycreep (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	735.2035161	1568.832894	1981.896309	2265.130587	3643.869138
<b>0.25</b>	859.0303687	1338.251179	1579.682426	2838.590763	3236.292116
<b>0.5</b>	671.0091628	1429.375496	1825.765703	2038.422378	2113.657656
<b>0.75</b>	767.8386443	1263.584895	1476.967936	2574.484016	3226.813477
<b>1</b>	686.3147934	1353.461506	1843.287716	2133.622267	2265.221418
<b>1.25</b>	737.9291535	1369.686697	2021.44536	2399.315019	2716.041385
<b>3</b>	955.0652548	1714.983475	2431.957664	3028.673624	3183.901388

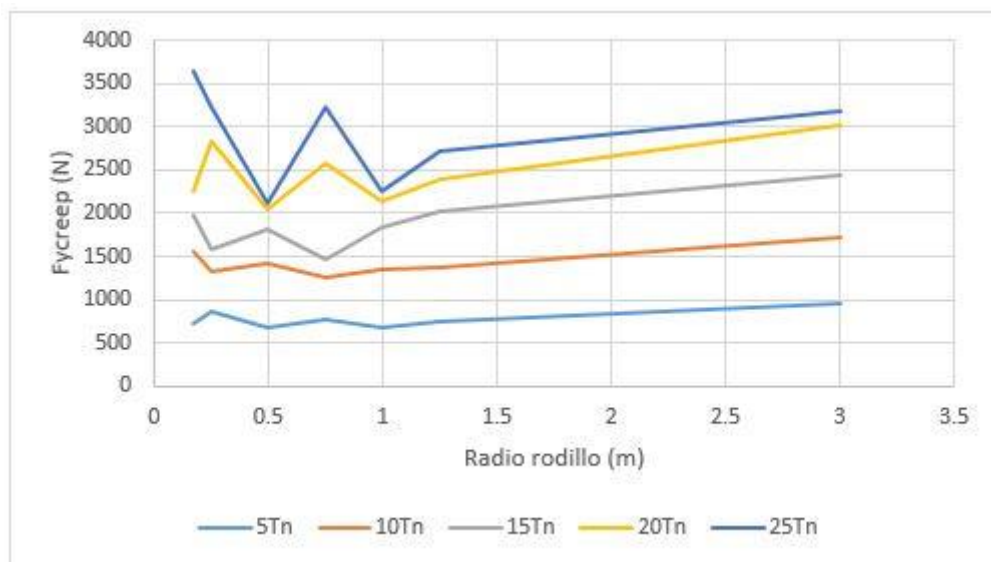


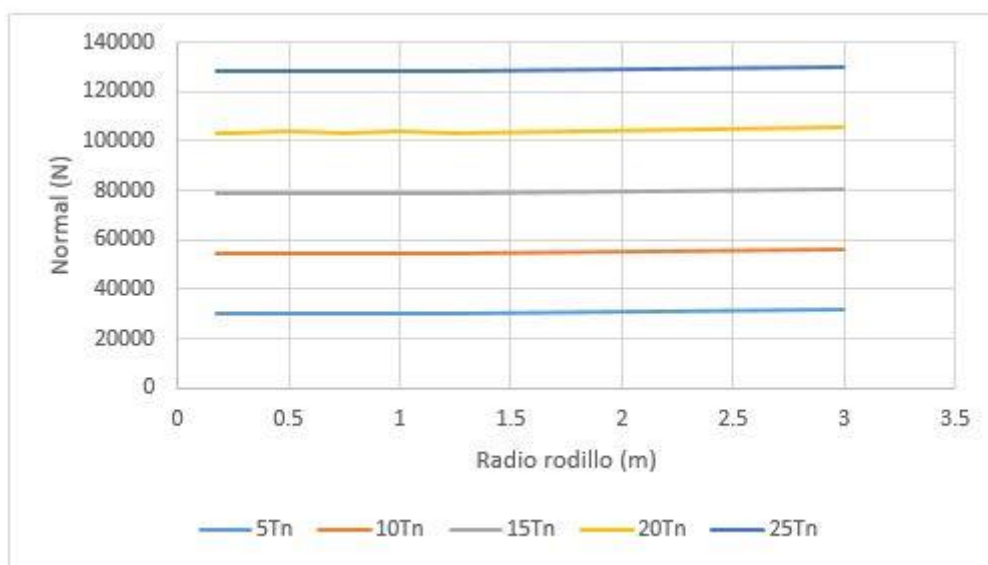
Fig. 42. Evolución de Fycreep para  $V=5$  m/s

En la figura 42, se observa como esta fuerza, en dirección transversal al desplazamiento del *wheelset*, presenta valores muy heterogéneos para cargas altas sobre el mismo.

- **Fuerza normal**

TABLA. 4: FUERZA NORMAL PARA  $V=5$  m/s

Radio (m)	Normal (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	30122.00309	54612.01959	79122.0856	103637.1281	128101.9006
<b>0.25</b>	30121.08933	54622.46101	79141.57878	103610.5315	128112.2949
<b>0.5</b>	30125.23828	54618.8059	79128.7716	103648.4447	128175.1568
<b>0.75</b>	30120.53509	54626.13672	79146.04688	103624.0668	128123.6406
<b>1</b>	30124.41211	54617.6612	79127.72656	103643.6953	128167.8203
<b>1.25</b>	30122.0637	54621.79092	79118.35809	103630.4453	128145.3047
<b>3</b>	31849.41884	56343.06081	80840.97193	105341.295	129860.3906

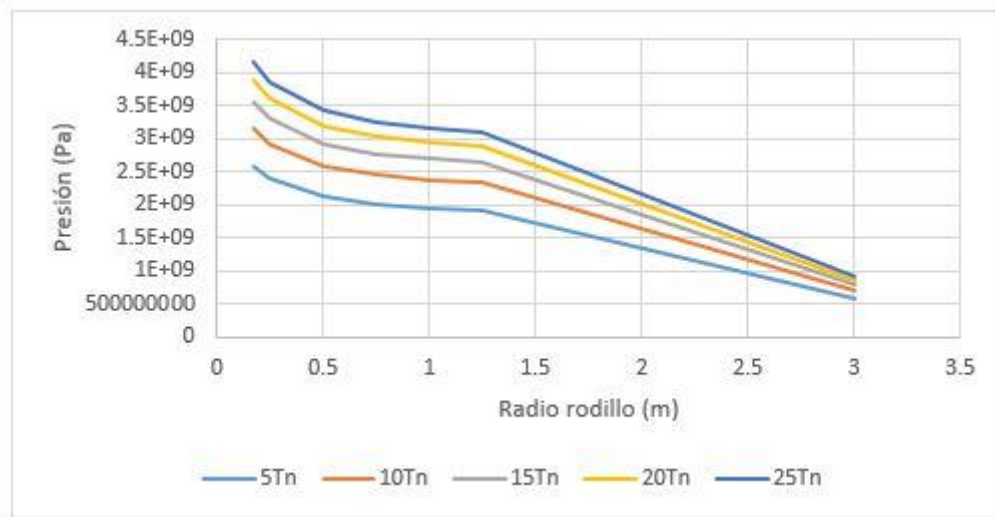
Fig. 43. Evolución de la Fuerza normal para  $V=5$  m/s

A diferencia de las demás variables, en la imagen 43 se puede apreciar como la fuerza normal adquiere un valor dependiendo de la carga impuesta, manteniéndose constante para cada radio de rodillo.

- **Presión en el contacto**

TABLA. 5: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA  $V=5$  m/s

Radio (m)	Presión (Pa)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	2578465070	3145016159	3556760313	3887582731	4165744933
<b>0.25</b>	2388042498	2911467043	3294325491	3600485031	3859067274
<b>0.5</b>	2117550848	2582398538	2921736942	3194867744	3425898505
<b>0.75</b>	2010631601	2451237632	2773459968	3032817861	3251957521
<b>1</b>	1951765376	2379357390	2692664576	2944825600	3158484224
<b>1.25</b>	1914257688	2334372065	2641065620	2888856832	3098237952
<b>3</b>	582195556.6	704123862.2	794169626.8	867433687.6	930100800

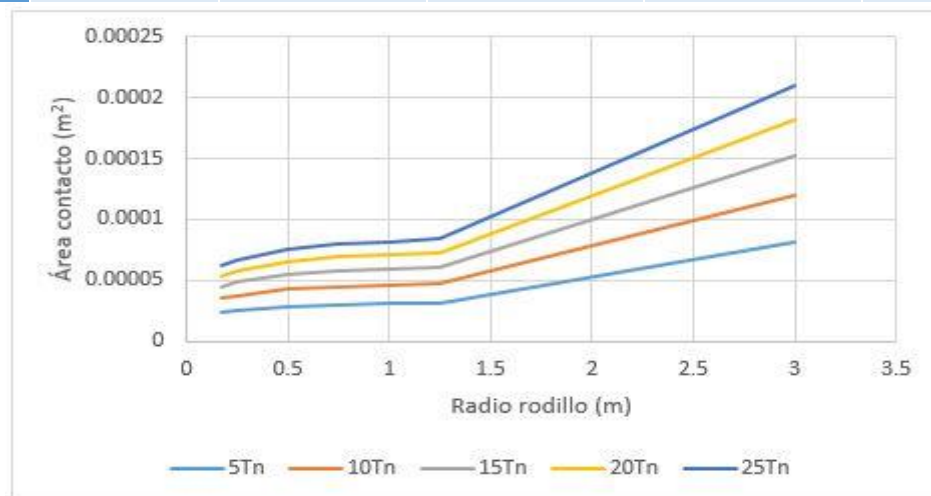
Fig. 44. Evolución de la Presión en el contacto para  $V=5$  m/s

En la evolución de esta variable presentada en la figura 44, se puede observar como disminuye esta exactamente igual para cada carga. Además, se puede apreciar una brusca disminución cuando pasamos de la simulación en rodillos a la simulación sobre la vía.

- **Área de contacto**

TABLA. 6: ÁREA DE CONTACTO PARA  $V=5$  m/s

Radio (m)	Área contacto ( $m^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2.3587E-05	3.50849E-05	4.49775E-05	5.40016E-05	6.24298E-05
0.25	2.54716E-05	3.78978E-05	4.85706E-05	5.82865E-05	6.73475E-05
0.5	2.8726E-05	4.27264E-05	5.47163E-05	6.56244E-05	7.58291E-05
0.75	3.02526E-05	4.50063E-05	5.76556E-05	6.91002E-05	7.97893E-05
1	3.11562E-05	4.6346E-05	5.93852E-05	7.11562E-05	8.21983E-05
1.25	3.17485E-05	4.72605E-05	6.0514E-05	7.25425E-05	8.377E-05
3	8.20585E-05	0.000120028	0.00015269	0.00018216	0.00020943

Fig. 45. Evolución del Área de contacto para  $V=5$  m/s

Esta variable está íntimamente relacionada con la presión que se ejerce en el contacto y por tanto, cuando menor sea el área del contacto rueda-rodillo mayor será la presión en esa zona.

De esta forma, podemos observar en la figura 45 como el área aumenta progresivamente para cada carga, y sufre un brusco aumento cuando se pasa de circular sobre rodillo a vía.

- **Área de adhesión**

TABLA. 7: ÁREA DE ADHESIÓN PARA  $V=5$  m/s

Radio (m)	Área adhesión (m <sup>2</sup> )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	1.45548E-05	3.02275E-05	3.13698E-05	2.41038E-05	5.20375E-05
<b>0.25</b>	2.26345E-05	2.64157E-05	1.7035E-05	4.92782E-05	6.08032E-05
<b>0.5</b>	1.58862E-05	3.61E-05	3.42169E-05	2.50627E-05	1.83484E-05
<b>0.75</b>	2.59258E-05	3.055E-05	1.99526E-05	5.57549E-05	6.33396E-05
<b>1</b>	2.03352E-05	3.88822E-05	4.34126E-05	3.39689E-05	2.47881E-05
<b>1.25</b>	2.60674E-05	4.10188E-05	5.37288E-05	5.24686E-05	4.3383E-05
<b>3</b>	6.97904E-05	0.000101848	0.000129656	0.000146913	0.000158761

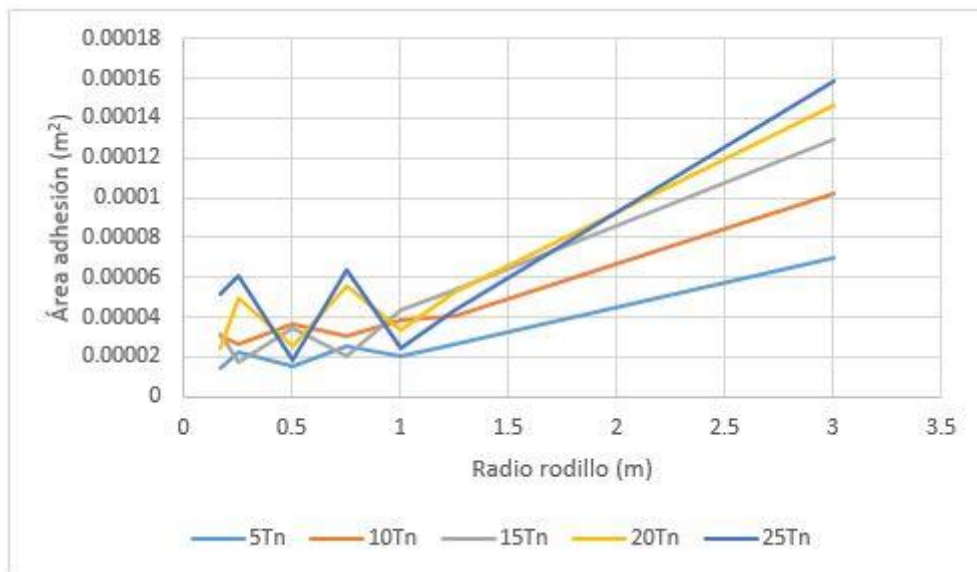


Fig. 46. Evolución del Área de adhesión para  $V=5$  m/s

Esta variable representa el área en la que se produce adhesión entre ambos cuerpos durante la rodadura, y por ello su valor es siempre menor al área del contacto total.

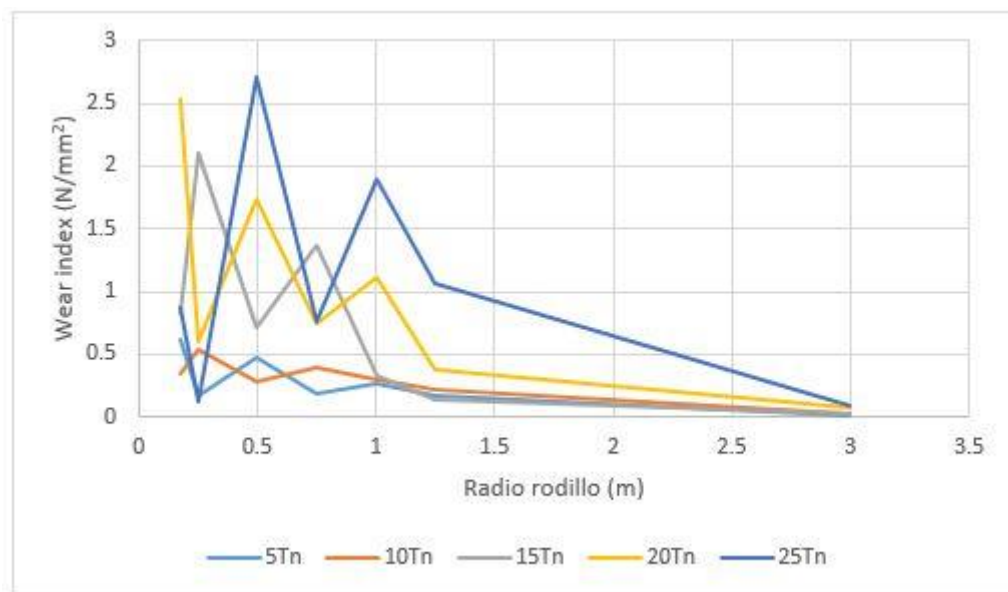
En la figura 46, se aprecia como su evolución durante la circulación sobre rodillos no sigue una función progresiva, sino que cuenta con saltos.

Sin embargo, como se verá posteriormente, al aumentar la velocidad de circulación esta zona se suaviza notablemente.

- Wear index

TABLA. 8: WEAR INDEX PARA  $V=5$  m/s

Radio (m)	Wear index ( $N/mm^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	0.62606051	0.341678747	0.827804758	2.530189978	0.8810966
<b>0.25</b>	0.178439901	0.537642395	2.106512018	0.599764978	0.117025336
<b>0.5</b>	0.48229539	0.28497797	0.707463926	1.728984108	2.708027913
<b>0.75</b>	0.190402756	0.390893089	1.375426292	0.738893734	0.765489687
<b>1</b>	0.264552085	0.297187331	0.33341678	1.116141318	1.892792127
<b>1.25</b>	0.173188985	0.217818968	0.136398222	0.382166206	1.06035962
<b>3</b>	0.015128931	0.026804816	0.030120509	0.071360318	0.092361154

Fig. 47. Evolución de Wear index para  $V=5$  m/s

Esta variable, que representa el índice de desgaste durante el contacto, cuenta con una progresión muy turbulenta para la velocidad de 5 m/s durante la circulación sobre rodillos, como se puede observar en la imagen 47.

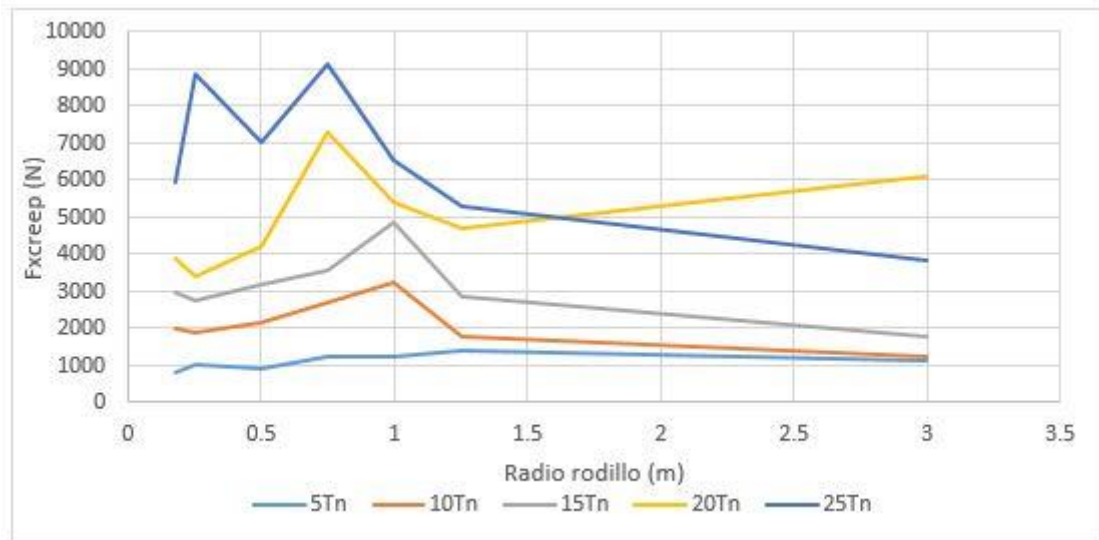
Sin embargo, este valor es prácticamente nulo cuando sometemos al eje calado a una circulación sobre vía, o lo que es lo mismo, con un radio de rodillo infinito

2)  $V=10$  m/s

## • Fxcreep

TABLA. 9: FXCREEP PARA  $V=10$  m/s

Radio (m)	Fxcreep (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	835.5415912	2026.711612	2957.381829	3874.352129	5966.664143
<b>0.25</b>	1041.229302	1881.987881	2773.927162	3412.832246	8853.120804
<b>0.5</b>	944.2493251	2174.943921	3180.259939	4206.258708	7020.611952
<b>0.75</b>	1249.334965	2688.761544	3543.163798	7318.617391	9113.181295
<b>1</b>	1244.111243	3261.289036	4858.10025	5386.034559	6518.807169
<b>1.25</b>	1409.304959	1760.141614	2854.875059	4703.678256	5292.31218
<b>3</b>	1115.595194	1231.854628	1767.748328	6100.930102	3839.896509

Fig. 48. Evolución de Fxcreep para  $V=10$  m/s

Comparando la figura 48 con la 41, se puede apreciar como los valores máximos de esta fuerza se reducen considerablemente al aumentar solamente en 5 m/s la velocidad.

Pasando, por ejemplo para la carga de 25 Tn, de un valor máximo de 35 KN a poco más de 9 KN.



- Fycreep

TABLA. 10: FYCREEP PARA V=5 m/s

Radio (m)	Fycreep (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	1009.862669	1565.633002	2564.257107	3334.906983	3957.100927
0.25	933.5776482	1724.144021	2464.72547	2918.11304	3206.300296
0.5	902.2052598	1378.770237	2309.723657	3006.63204	3551.43715
0.75	837.2417719	1518.333337	2202.235669	2725.451554	3000.404026
1	844.3685204	1459.613147	2108.538568	2784.163663	3436.985763
1.25	705.9158621	1548.718469	1924.359358	2886.272249	3510.050873
3	968.6965582	1947.264415	2689.462305	2858.533244	4393.44175

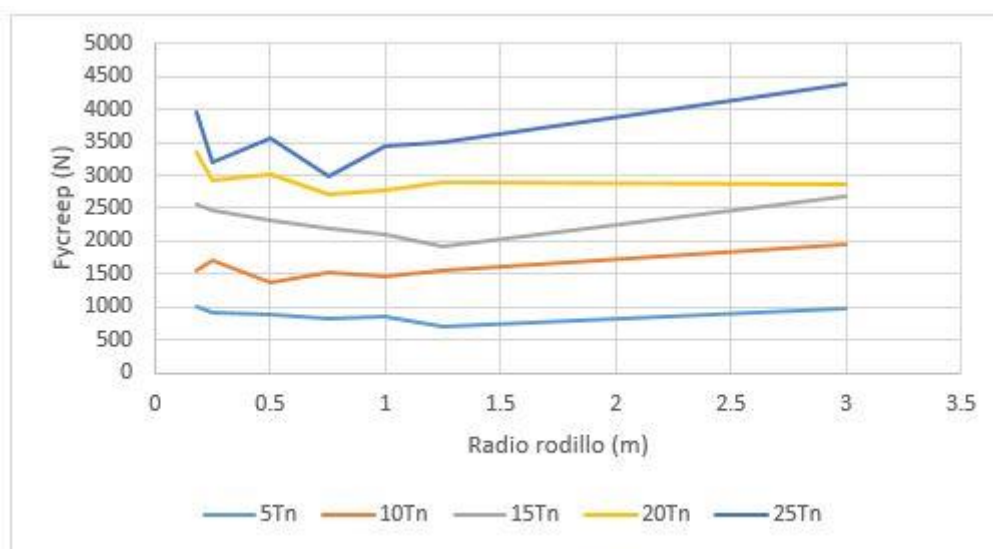


Fig. 49. Evolución de Fycreep para V=10 m/s

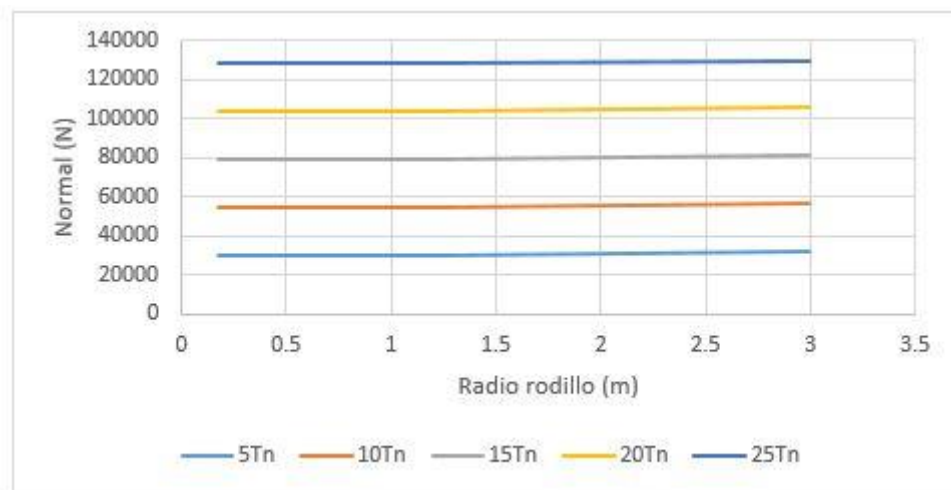
El rango de valores de esta fuerza es muy parecido para las velocidades de 5 y 10 m/s, sin embargo, en la figura 49 se puede observar como un ligero aumento de la velocidad ha significado una mayor suavidad de la evolución de Fycreep para la carga de 25 Tn.

- Fuerza normal

TABLA. 11: FUERZA NORMAL PARA V=10 m/s

Radio (m)	Normal (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	30108.83875	54611.88517	79087.1221	103586.273	128086.5816
0.25	30112.68664	54603.84328	79098.22755	103604.1828	128120.2149
0.5	30113.83768	54620.41407	79105.82951	103602.0135	128106.0861
0.75	30117.45554	54610.46256	79111.51659	103616.5801	128130.7656
1	30117.16085	54616.91839	79115.40689	103613.4963	128108.2334
1.25	30123.46483	54612.24202	79123.79688	103608.5078	128109.0941
3	31848.81858	56328.79621	80800.16238	105346.0196	129799.9207



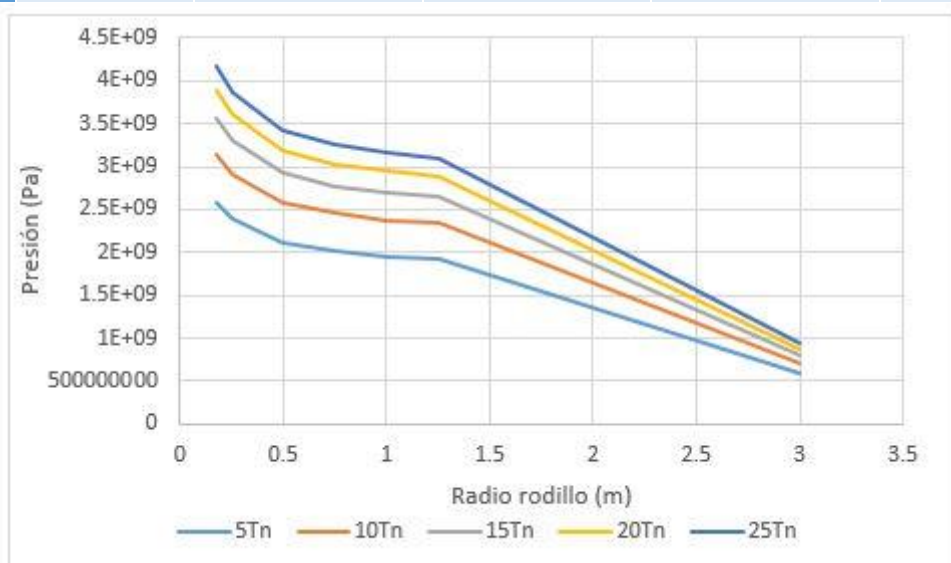
Fig. 50. Evolución de la Fuerza normal para  $V=10$  m/s

La figura 50 muestra como la evolución de la fuerza normal se mantiene constante independientemente de la velocidad impuesta al eje calado.

- **Presión en el contacto**

TABLA. 12: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA  $V=10$  m/s

Radio (m)	Presión (Pa)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	2578101441	3145034087	3556233787	3886953463	4165581071
<b>0.25</b>	2388062224	2911136872	3293726755	3600413550	3859144401
<b>0.5</b>	2117282142	2582424064	2921458335	3194396640	3425295120
<b>0.75</b>	2010563366	2451003239	2773053635	3032745453	3252017408
<b>1</b>	1951610028	2379346929	2692524485	2944543067	3158004934
<b>1.25</b>	1914287360	2334235454	2641127424	2888653729	3097951391
<b>3</b>	582191968	704063976.3	794032786.5	867446976.1	929953860.8

Fig. 51. Evolución de la Presión en el contacto para  $V=10$  m/s

Como se puede observar en la figura 51, apenas existen diferencias apreciables en los valores de las presiones de contacto a 5 y a 10 m/s.

- Área de contacto

TABLA. 13: ÁREA DE CONTACTO PARA  $V=10$  m/s

Radio (m)	Área contacto (m <sup>2</sup> )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	2.35803E-05	3.50852E-05	4.49644E-05	5.39841E-05	6.24247E-05
<b>0.25</b>	2.54697E-05	3.78893E-05	4.85528E-05	5.82841E-05	6.73503E-05
<b>0.5</b>	2.8719E-05	4.27272E-05	5.47059E-05	6.56051E-05	7.58017E-05
<b>0.75</b>	3.02504E-05	4.49977E-05	5.76392E-05	6.90969E-05	7.97922E-05
<b>1</b>	3.11511E-05	4.63456E-05	5.93789E-05	7.11426E-05	8.21725E-05
<b>1.25</b>	3.17495E-05	4.72552E-05	6.05168E-05	7.25323E-05	8.37534E-05
<b>3</b>	8.20575E-05	0.000120008	0.000152638	0.000182166	0.000209365

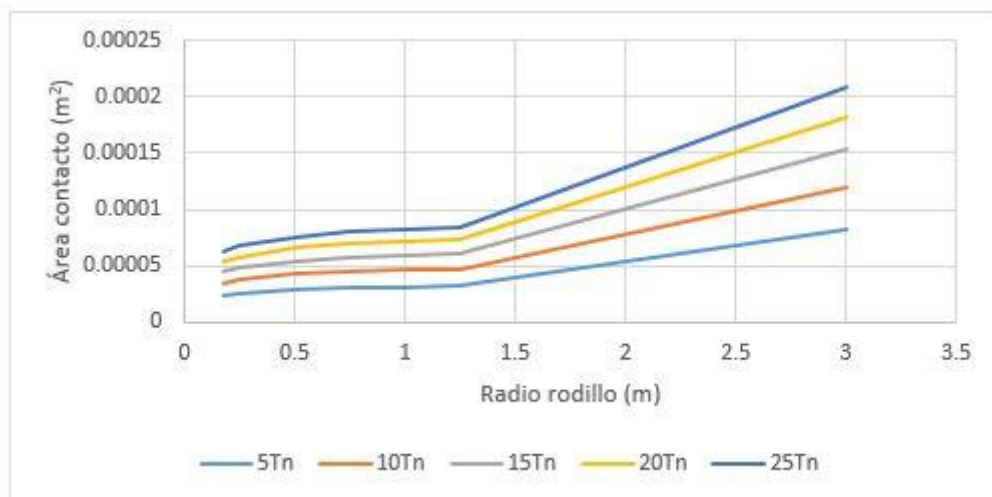


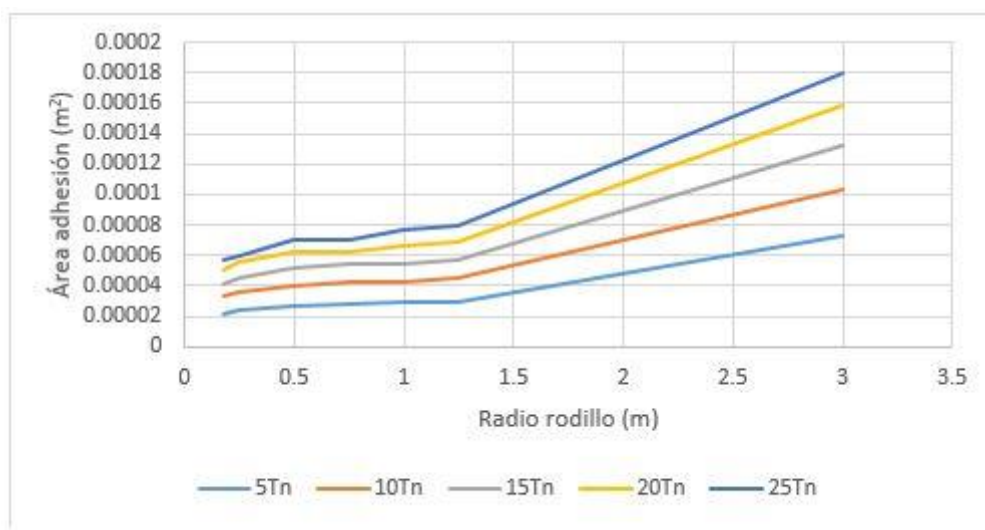
Fig. 52. Evolución del Área de contacto para  $V=10$  m/s

Debido a la relación directa del área de contacto con la presión ejercida en el mismo, al no variar esta última respecto al caso anterior, tampoco lo va a hacer la evolución de la superficie de contacto.

- Área de adhesión

TABLA. 14: ÁREA DE ADHESIÓN PARA  $V=10$  m/s

Radio (m)	Área adhesión ( $m^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2.20935E-05	3.30455E-05	4.17938E-05	5.01741E-05	5.75057E-05
0.25	2.39873E-05	3.56552E-05	4.56402E-05	5.52794E-05	6.01292E-05
0.5	2.73923E-05	4.0259E-05	5.16795E-05	6.18371E-05	7.00284E-05
0.75	2.86128E-05	4.21737E-05	5.42571E-05	6.23192E-05	7.0392E-05
1	2.95691E-05	4.27509E-05	5.47266E-05	6.63504E-05	7.66821E-05
1.25	2.95321E-05	4.52922E-05	5.74667E-05	6.83999E-05	7.93217E-05
3	7.22954E-05	0.000103144	0.000132136	0.000158139	0.000180002

Fig. 53. Evolución del Área de adhesión para  $V=10$  m/s

Como ya se comentaba anteriormente, en la figura 53 se puede apreciar como variando la velocidad solamente 5 m/s se ha conseguido suavizar notablemente la evolución de esta variable, logrando así una progresión muy parecida a la que sigue el área de contacto.

- Wear index

TABLA. 15: WEAR INDEX PARA  $V=10$  m/s

Radio (m)	Wear index ( $N/mm^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	0.024502199	0.03631678	0.076668935	0.089744331	0.13947051
0.25	0.022345938	0.040839492	0.046558497	0.033364911	0.146291031
0.5	0.014446962	0.017694717	0.051050233	0.057127341	0.112797019
0.75	0.019507356	0.051447787	0.052398544	0.135563208	0.093782842
1	0.022560931	0.059914943	0.095375954	0.083858305	0.079159821
1.25	0.011734128	0.014810718	0.012858592	0.055437391	0.05358953
3	0.007111497	0.010144284	0.012445403	0.02237264	0.019169726

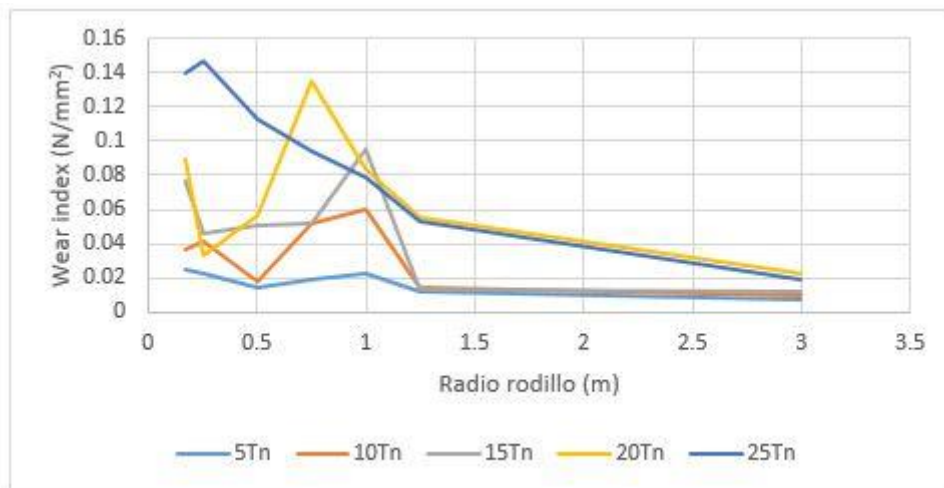


Fig. 54. Evolución de Wear index para V=10 m/s

Al igual que lo obtenido en la gráfica para V= 5 m/s, en la figura 54 se observar como el Wear index continúa presentando una tendencia irregular con numerosos picos durante la fase de circulación sobre rodillos.

### 3) V=15 m/s

- Fxcreep

TABLA. 16: FXCREEP PARA V=15 m/s

Radio (m)	Fxcreep (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	675.6953636	930.8767897	1350.325228	4284.797498	2956.630017
<b>0.25</b>	509.3141575	927.3626743	1902.91778	2323.973629	2967.586851
<b>0.5</b>	755.2398399	1068.290499	1589.685966	4593.754384	3170.543371
<b>0.75</b>	666.7454098	1538.303132	4108.079411	2899.258243	3629.473301
<b>1</b>	520.9302125	1259.458778	2242.583094	3119.724517	4929.513143
<b>1.25</b>	264.0861721	1190.986298	1609.429225	1406.464018	3276.647006
<b>3</b>	0.000233998	961.2359477	1086.915223	1323.076681	2404.245978

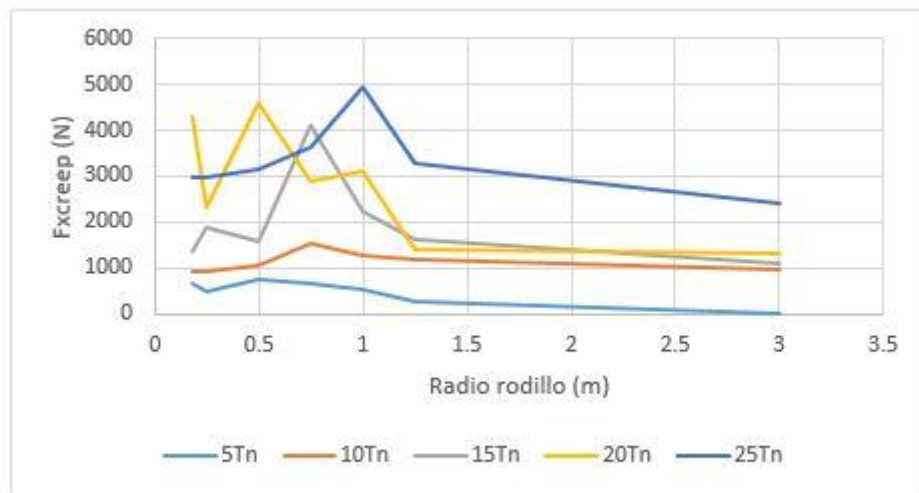


Fig. 55. Evolución de Fxcreep para V=15 m/s

Continuando con lo comentado en la anterior condición de velocidad, en la imagen 55 los valores máximos de esta variable se vuelven a reducir, siendo esta reducción más notoria en los casos de mayor carga.

- **Fycreep**

TABLA. 17: FYCREEP PARA V=15 m/s

Radio (m)	Fycreep (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	967.681009	1942.540412	2680.524831	2902.947751	4417.58808
0.25	1038.466944	1779.859159	2631.766962	3445.184978	4224.048699
0.5	842.5709153	1743.578979	2329.52144	2570.91269	3991.69774
0.75	932.7996946	1608.001119	1878.396897	3078.449416	3788.846426
1	874.8682327	1647.85301	2301.787967	2642.025639	3589.28734
1.25	1011.955589	1656.682115	2398.346553	3133.334725	3355.65996
3	1264.480648	2019.966607	2948.629368	3833.900053	4546.622015

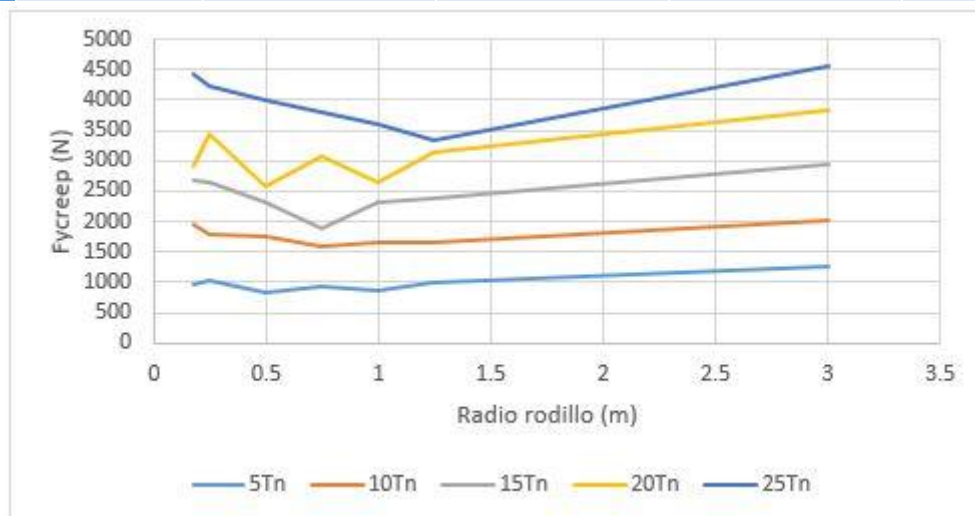


Fig. 56. Evolución de Fycreep para V=15 m/s

En la figura 56, se puede apreciar como la evolución de Fycreep a esta velocidad comparada con la anterior presenta pequeñas diferencias en la evolución a cargas mayores.

Además, estas siguen produciéndose durante las simulaciones sobre el banco de rodillos.

- **Fuerza normal**

TABLA. 18: FUERZA NORMAL PARA  $V=15$  m/s

	Normal (N)				
Radio (m)	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	30110.35725	54593.15171	79086.79912	103605.0256	128061.5937
0.25	30107.04229	54600.38651	79093.12193	103578.4266	128072.7176
0.5	30116.625	54605.78277	79103.47656	103622.0156	128083.6393
0.75	30113.90432	54609.28272	79126.01562	103598.045	128092.8156
1	30115.01758	54607.22137	79104.63528	103618.375	128105.1411
1.25	30229.82657	54607.7662	79100.30517	103593.8125	128113.1016
3	31834.05078	56326.75672	80817.15392	105474.7258	129782.3958

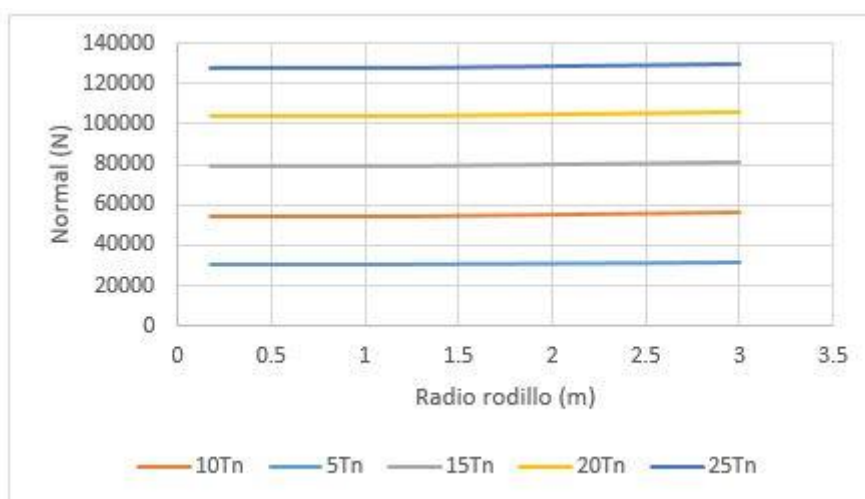
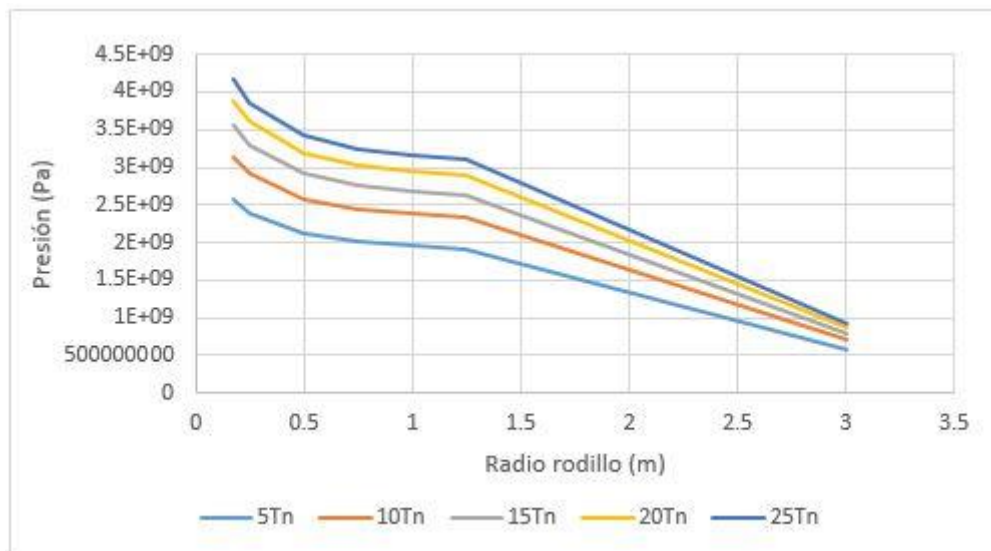


Fig. 57. Evolución de la Fuerza normal para  $V=15$  m/s

- **Presión en el contacto**

TABLA. 19: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA  $V=15$  m/s

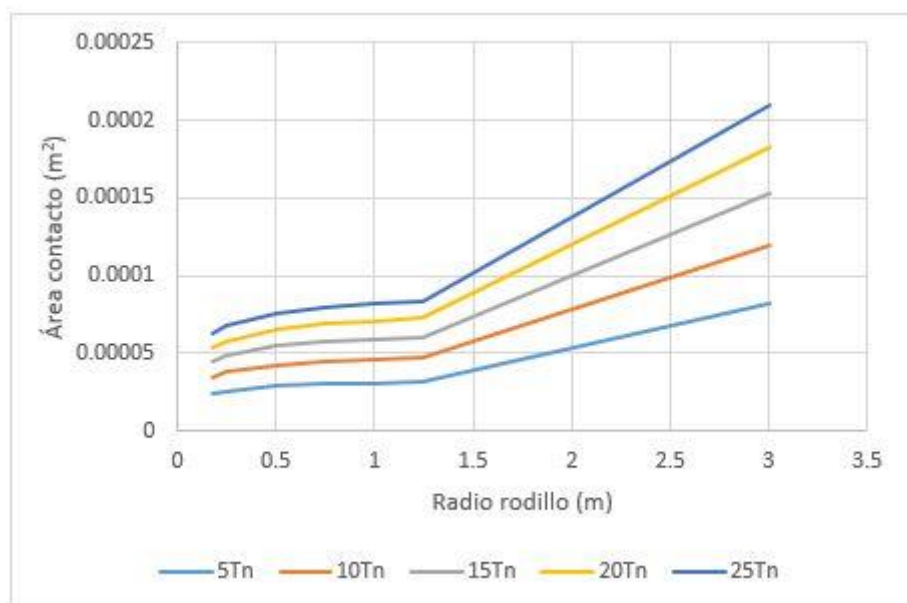
	Presión (Pa)				
Radio (m)	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2578146110	3144629520	3556231795	3887186639	4165317398
0.25	2387911190	2911076870	3293656355	3600120170	3858680654
0.5	2117348224	2582194077	2921430272	3194599936	3425099335
0.75	2010484694	2450985993	2773224960	3032564960	3251700097
1	1951564736	2379205977	2692401868	2944589568	3157980417
1.25	1913759151	2334171720	2640866469	2888518656	3097984000
3	582101568	704055450	794090057.4	867475069.2	929910209.4

Fig. 58. Evolución de la Presión en el contacto para  $V=15$  m/s

- Área de contacto

TABLA. 20: ÁREA DE CONTACTO PARA  $V=15$  m/s

Radio (m)	Área contacto ( $m^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2.35811E-05	3.50763E-05	4.49644E-05	5.39904E-05	6.24166E-05
0.25	2.54666E-05	3.78878E-05	4.85506E-05	5.82741E-05	6.73334E-05
0.5	2.87207E-05	4.27197E-05	5.47048E-05	6.56134E-05	7.57928E-05
0.75	3.02478E-05	4.49971E-05	5.76461E-05	6.90887E-05	7.97766E-05
1	3.11496E-05	4.63402E-05	5.93734E-05	7.11448E-05	8.21712E-05
1.25	3.17922E-05	4.72527E-05	6.05049E-05	7.25255E-05	8.37553E-05
3	8.20322E-05	0.000120005	0.00015266	0.000182245	0.000209346

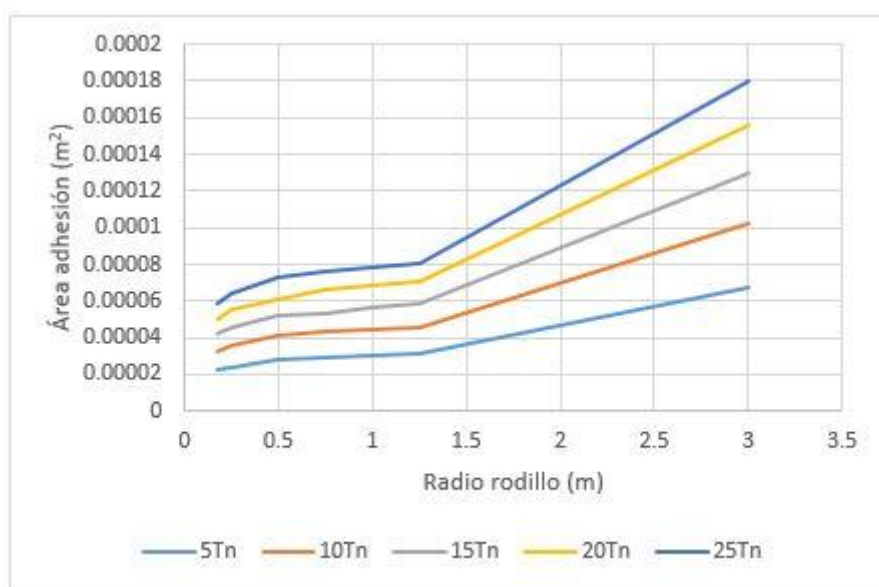
Fig. 59. Evolución del Área de contacto para  $V=15$  m/s



- Área de adhesión

TABLA. 21: ÁREA DE ADHESIÓN PARA  $V=15$  m/s

Radio (m)	Área adhesión ( $m^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2.2352E-05	3.2913E-05	4.23342E-05	5.04831E-05	5.83506E-05
0.25	2.41821E-05	3.5854E-05	4.5944E-05	5.51768E-05	6.37116E-05
0.5	2.77014E-05	4.1033E-05	5.26845E-05	6.13734E-05	7.24514E-05
0.75	2.91406E-05	4.3179E-05	5.35445E-05	6.6237E-05	7.63772E-05
1	3.01963E-05	4.4768E-05	5.70733E-05	6.87852E-05	7.79684E-05
1.25	3.09663E-05	4.5702E-05	5.86229E-05	7.0477E-05	8.07138E-05
3	6.78876E-05	0.00010265	0.00012999	0.000156227	0.000179778

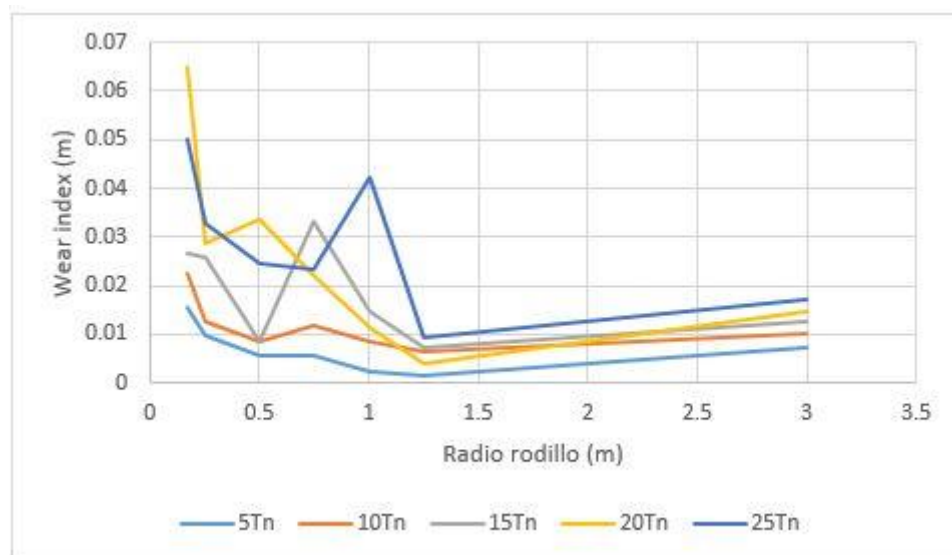
Fig. 60. Evolución del Área de adhesión para  $V=15$  m/s

- Wear index

TABLA. 22: WEAR INDEX PARA  $V=15$  m/s

Radio (m)	Wear index ( $N/mm^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	0.015704919	0.022683693	0.026837394	0.064817838	0.050202893
0.25	0.009606405	0.012522287	0.025769926	0.028548573	0.032657266
0.5	0.005642387	0.008523878	0.008733495	0.033572871	0.024423425
0.75	0.005731555	0.011671782	0.033068633	0.021951674	0.023553933
1	0.002471387	0.008546047	0.014556689	0.011620626	0.042217108
1.25	0.001668609	0.006599576	0.007501145	0.004177262	0.009485792
3	0.007169654	0.010047231	0.012748548	0.014681588	0.017300953



Fig. 61. Evolución de Wear index para  $V=15$  m/s

En la figura 61 ya se puede observar como el aumento de velocidad hasta los 15 m/s provoca que la función de todas las cargas tienda a aproximarse a 0 para luego aumentar levemente durante la circulación en vía.

Sin embargo, aún se puede observar como las funciones de las cargas mayores cuentan con algún punto que se escapa de dicha tendencia.

#### 4) $V=20$ m/s

- **Fxcreep**

TABLA. 23: FXCREEP PARA  $V=20$  m/s

Radio (m)	Fxcreep (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	311.3022163	783.5972655	977.0037906	1668.13487	2721.068428
<b>0.25</b>	534.8480465	677.2269913	1055.897584	3413.302268	2069.199957
<b>0.5</b>	363.886866	823.1473115	1119.880284	1856.774317	3044.743936
<b>0.75</b>	524.5676442	818.5676047	1515.669858	3167.728836	2697.151276
<b>1</b>	4.308004136	1235.076584	1332.515916	1928.496911	2777.443928
<b>1.25</b>	7.386942965	473.4857105	1286.569422	1443.737508	1945.133554
<b>3</b>	9.54602E-05	0.000591222	937.1746548	947.8757169	1105.698196

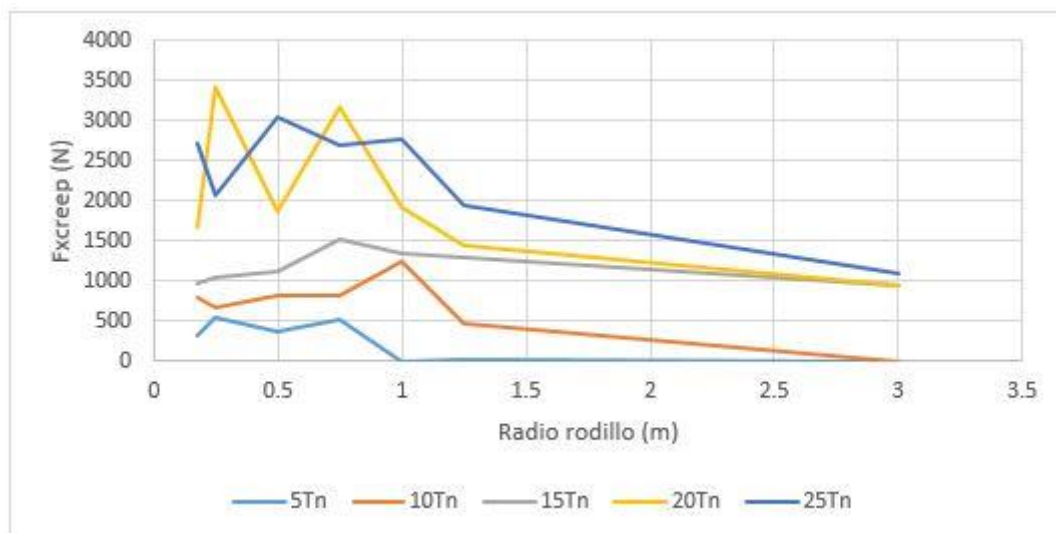


Fig. 62. Evolución de Fxcreep para V=20 m/s

En la figura 62 se puede apreciar, como una velocidad de 20 m/s consigue aplanar las funciones de menor carga, asemejando de esta manera la circulación en rodillos a la circulación en vía.

Por otro lado, en la figura también se aprecia como la evolución de las funciones de mayor carga, las de 20 y 25 Tn, aún presentan irregularidades en la circulación sobre rodillos.

- **Fycreep**

TABLA. 24: FYCREEP PARA V=20 m/s

Radio (m)	Fycreep (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	1123.2698	1993.67565	2911.39665	3696.70829	4155.95732
<b>0.25</b>	972.626504	1945.20597	2686.5288	2921.065	4442.2184
<b>0.5</b>	1016.432	1813.90942	2631.964	3332.54	3632.532
<b>0.75</b>	888.272	1765.39	2468.53	2679.825	3983.99
<b>1</b>	1111.62	1597.75	2485.43	3195.33	3822.91
<b>1.25</b>	1102.22	1801.449	2490.54	3310.18	4023.784
<b>3</b>	1264.480692	2236.928895	2993.324215	3949.557633	4645.695013

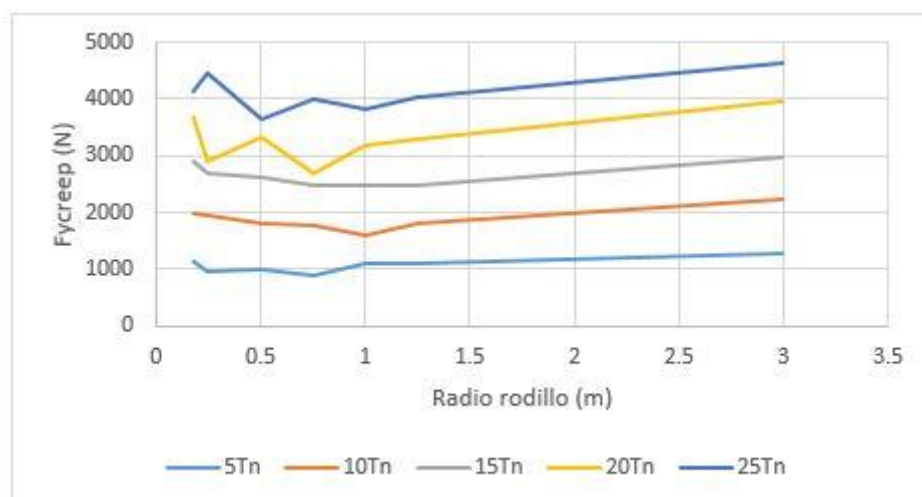


Fig. 63. Evolución de Fycreep para V=20 m/s

En la imagen 63, la Fycreep sigue manteniendo la misma evolución suave con valores muy parecidos a los obtenidos anteriormente, exceptuando picos puntuales cuando se somete al eje a cargas superiores.

- **Fuerza normal**

TABLA. 25: FUERZA NORMAL PARA V=20 m/s

Radio (m)	Normal (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	30102.7068	54590.0945	79078.5054	103566.439	128072.866
0.25	30110.1245	54592.6394	79085.7	103604.472	128059.512
0.5	30108.5415	54601.05	79087.8	103584.678	128099.33
0.75	30114.34	54600.449	79095.78	103616.46	128085.2
1	30276.85	54834.16	79095.11	103588.95	128133.64
1.25	30255.73	54785.52	79097.41	103584.9	128077.77
3	31834.05078	56316.01562	80808.73242	105299.2588	129833.3545

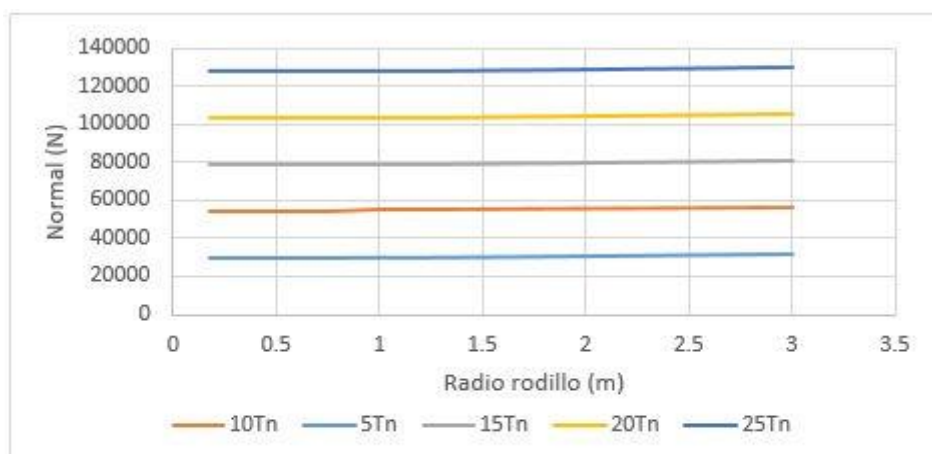
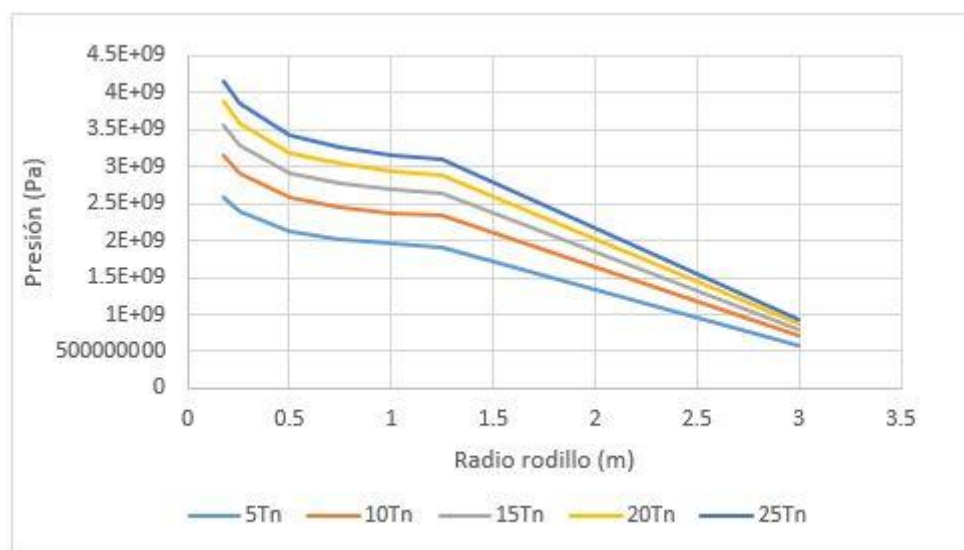


Fig. 64. Evolución de la Fuerza normal para V=20 m/s

- Presión en el contacto

TABLA. 26: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA  $V=20$  m/s

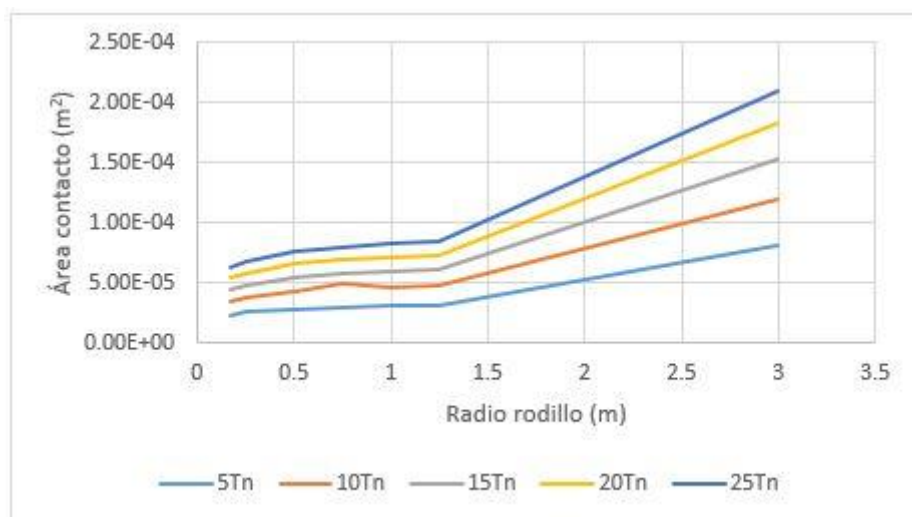
Radio (m)	Presión (Pa)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2577927930	3144618136	3556106522	3886709103	4165437445
0.25	2387994095	2910939554	3293554604	3600416979	3858552578
0.5	2117157790	2582119340	2921239469	3194220615	3425236744
0.75	2010494911	2450855147	2772868388	3032744704	3251636757
1	1951362874	2378303794	2692294330	2944313821	3158207278
1.25	1913530476	2332023345	2640834970	2888435986	3097704423
3	582101568	704010368	794063011.5	867316196.3	930024923.5

Fig. 65. Evolución de la Presión en el contacto para  $V=20$  m/s

- Área de contacto

TABLA. 27: ÁREA DE CONTACTO PARA  $V=20$  m/s

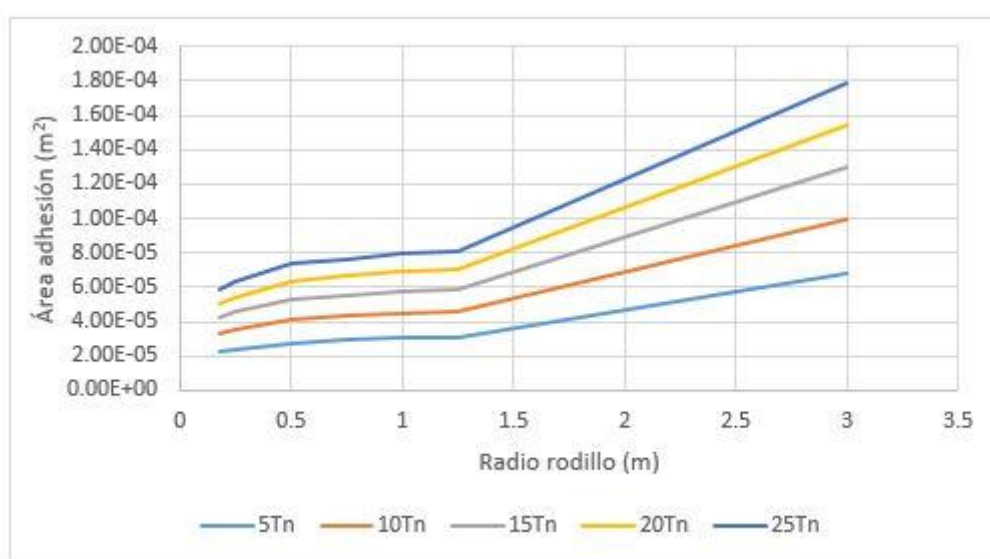
Radio (m)	Área contacto (m <sup>2</sup> )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2.36E-05	3.51E-05	4.50E-05	5.40E-05	6.24E-05
0.25	2.55E-05	3.79E-05	4.85E-05	5.83E-05	6.73E-05
0.5	2.87E-05	4.27E-05	5.47E-05	6.56E-05	7.58E-05
0.75	3.02E-05	4.99E-05	5.76E-05	6.91E-05	7.98E-05
1	3.12E-05	4.64E-05	5.94E-05	7.11E-05	8.22E-05
1.25	3.18E-05	4.73E-05	6.05E-05	7.25E-05	8.37E-05
3	8.20322E-05	0.00011999	0.000152649	0.000182112	0.000209399

Fig. 66. Evolución del Área de contacto para  $V=15$  m/s

- Área de adhesión

TABLA. 28: ÁREA DE ADHESIÓN PARA  $V=20$  m/s

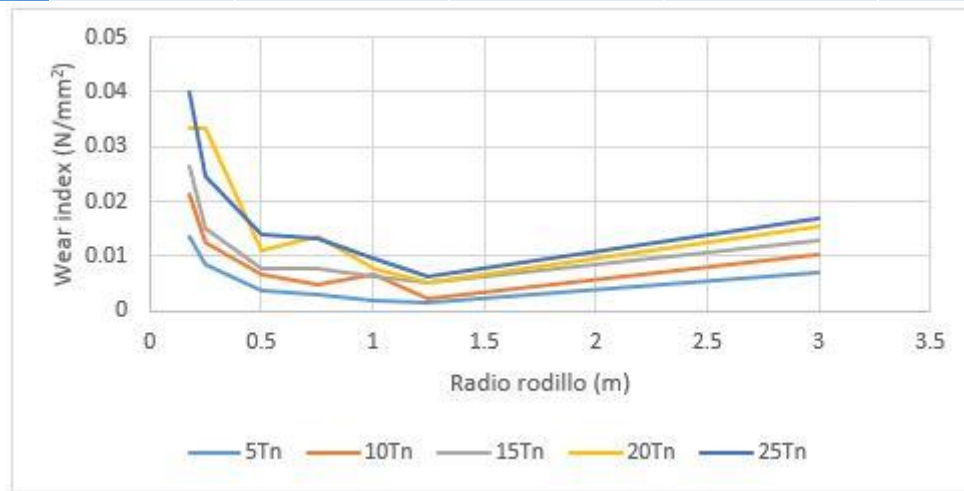
Radio (m)	Área adhesión ( $m^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2.21E-05	3.29E-05	4.21E-05	5.05E-05	5.90E-05
0.25	2.42E-05	3.60E-05	4.62E-05	5.36E-05	6.38E-05
0.5	2.76E-05	4.10E-05	5.26E-05	6.30E-05	7.35E-05
0.75	2.91E-05	4.35E-05	5.56E-05	6.64E-05	7.68E-05
1	3.04E-05	4.49E-05	5.75E-05	6.89E-05	7.95E-05
1.25	3.10E-05	4.60E-05	5.87E-05	7.04E-05	8.12E-05
3	6.78876E-05	9.93E-05	0.000129503	0.00015404	0.000178208

Fig. 67. Evolución del Área de adhesión para  $V=20$  m/s

- Wear index

TABLA. 29: WEAR INDEX PARA  $V=20$  m/s

Radio (m)	Wear index ( $N/mm^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	0.013573	0.02144	0.0264671	0.03347959	0.04017717
0.25	0.00858	0.01249	0.014949	0.033375	0.0245
0.5	0.00375	0.006534	0.007883	0.010997	0.0139722
0.75	0.002993	0.004872	0.007761	0.0134829	0.013417
1	0.00177	0.00654	0.00616	0.0078361	0.009568
1.25	0.001544	0.002365	0.0051	0.00522	0.006295
3	0.007169654	0.010487202	0.012804707	0.015309987	0.017084102

Fig. 68. Evolución de Wear index para  $V=20$  m/s

La figura 68, muestra como en estas condiciones de circulación ya se puede observar como el Wear index o índice de desgaste se reduce progresivamente y de la misma forma para todas las cargas al aumentar el radio de rodillo sobre el que circula.

## 5) $V=25$ m/s

- Fxcreep

TABLA. 30: FXCREEP PARA  $V=25$  m/s

Radio (m)	Fxcreep (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	218.9883263	591.0110205	812.1226655	966.3897191	1458.242658
0.25	257.5101409	521.1209424	792.8658481	1495.581342	2998.221438
0.5	243.1017181	796.9239538	901.9547967	1150.081449	1712.754808
0.75	116.6895722	687.7521596	946.02094	1608.701678	2813.74125
1	0.267260425	349.2265171	1218.719101	1343.19665	1775.385373
1.25	0.137914097	0.568446627	735.9110317	1238.36208	1387.851664
3	7.62893E-05	0.000208718	0.001565632	1544.814856	946.9707003

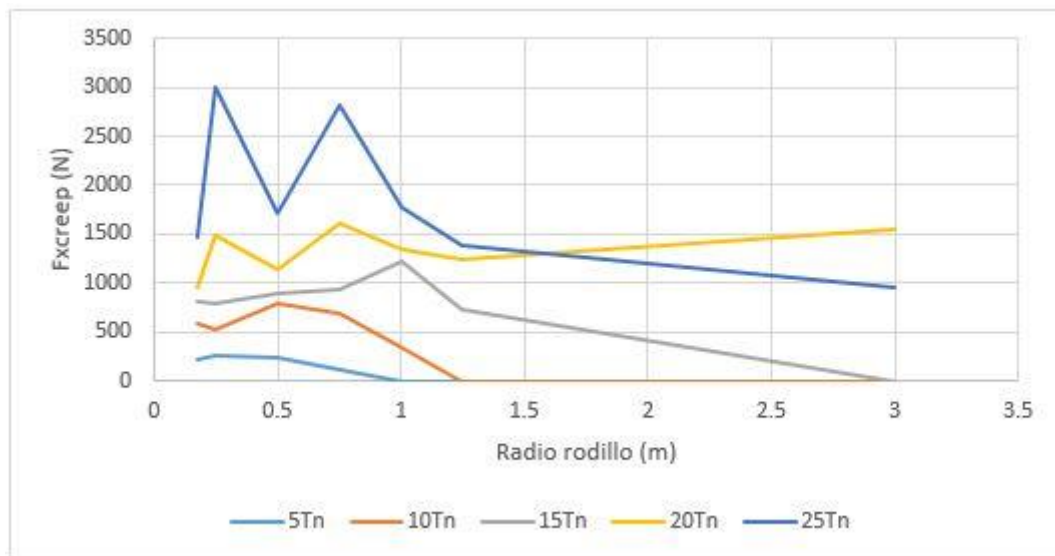


Fig. 69. Evolución de Fxcreep para V=25 m/s

En la última simulación de velocidad realizada, aún se puede apreciar en la figura 69 como la fuerza de deslizamiento en la dirección del desplazamiento mantiene una evolución irregular, únicamente disminuyendo los valores máximos para cada carga.

- **Fycreep**

TABLA. 31: FYCREEP PARA V=25 m/s

	Fycreep (N)				
Radio (m)	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	1154.675801	1975.649679	2967.997752	3903.818197	4734.687806
<b>0.25</b>	1103.641437	1999.367351	2869.225963	3616.967194	3910.080267
<b>0.5</b>	1061.202059	1718.144508	2709.283187	3535.51478	4276.732986
<b>0.75</b>	1085.603772	1813.466333	2620.35939	3314.182353	3584.049948
<b>1</b>	1115.587738	1873.620241	2526.005985	3365.185506	4108.013506
<b>1.25</b>	1106.192015	1999.692463	2620.790016	3381.733868	4207.286538
<b>3</b>	1264.4807	2236.928954	3209.376883	3709.388677	4923.927171

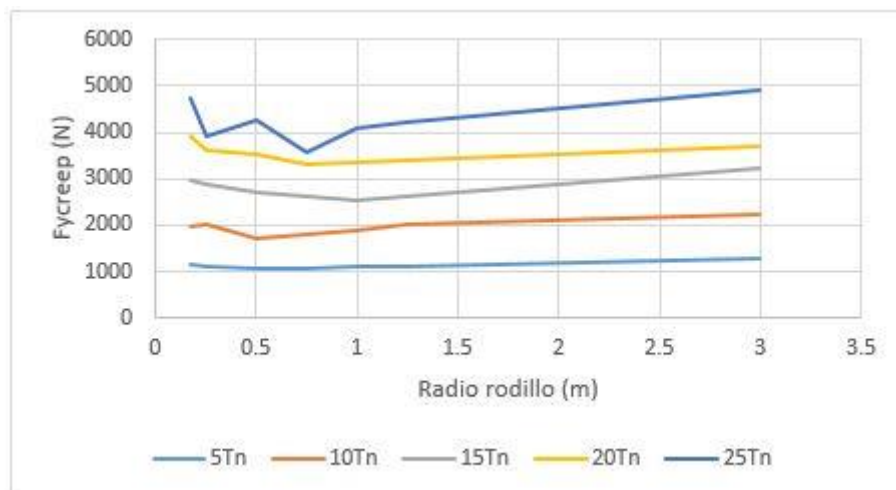


Fig. 70. Evolución de Fycreep para V=25 m/s



Por último, en la figura 70 se puede visualizar esa tendencia de suavidad de las funciones de Fycreep que se viene siguiendo en los casos anteriores a medida que se aumenta la velocidad de circulación.

- **Fuerza normal**

TABLA. 32: FUERZA NORMAL PARA V=20 m/s

Radio (m)	Normal (N)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	30101.01361	54590.57626	79059.97926	103557.2427	128044.6163
<b>0.25</b>	30103.68833	54589.06205	79076.47778	103570.4763	128085.4216
<b>0.5</b>	30105.85761	54603.45312	79083.26515	103575.0029	128066.6546
<b>0.75</b>	30176.15681	54599.43668	79089.66916	103581.3683	128101.6484
<b>1</b>	30262.76039	54801.01895	79094.40258	103582.815	128073.3976
<b>1.25</b>	30247.78764	54832.54518	79301.095	103583.574	128071.1921
<b>3</b>	31834.05078	56316.01562	80797.98206	105309.0077	129725.52

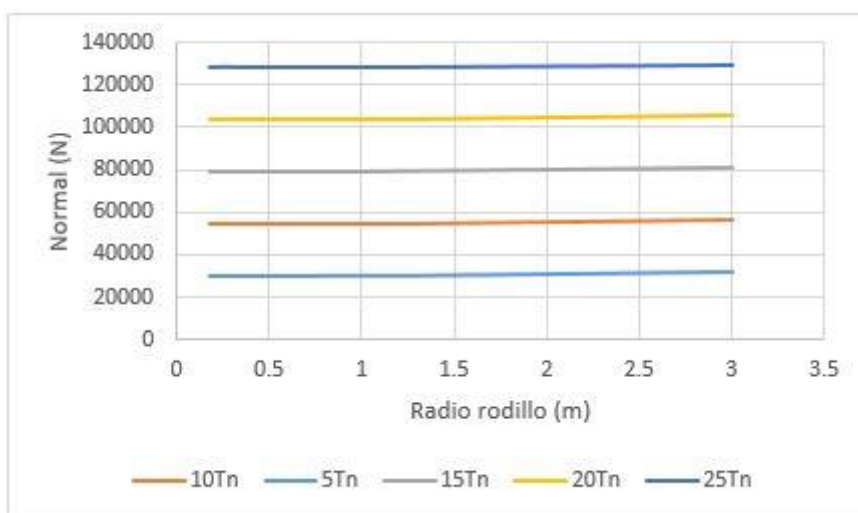


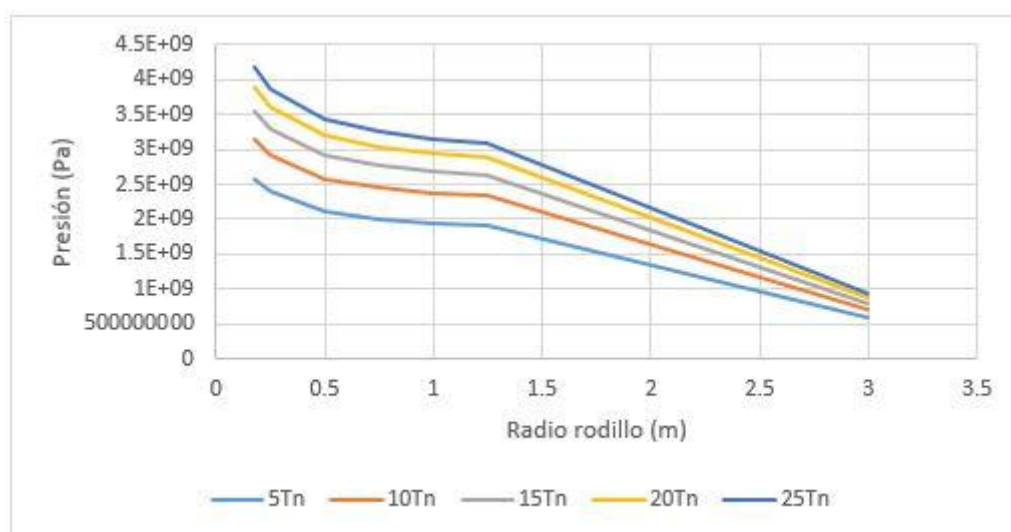
Fig. 71. Evolución de la Fuerza normal para V=25 m/s

- **Presión en el contacto**

TABLA. 33: PRESIÓN EN EL CONTACTO PARA V=25 m/s

Radio (m)	Presión (Pa)				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	2577879707	3144628388	3555825083	3886592550	4165134901
<b>0.25</b>	2387821340	2910876343	3293426830	3600031100	3858805572
<b>0.5</b>	2117094734	2582158336	2921183753	3194122564	3424951063
<b>0.75</b>	2009097158	2450840264	2772797437	3032402990	3251774464
<b>1</b>	1951042174	2377610025	2692286864	2944257615	3157724267
<b>1.25</b>	1913339441	2332608912	2640335076	2888419742	3097652664
<b>3</b>	582101568	704010368	794027388.9	867343561.7	929760310.3

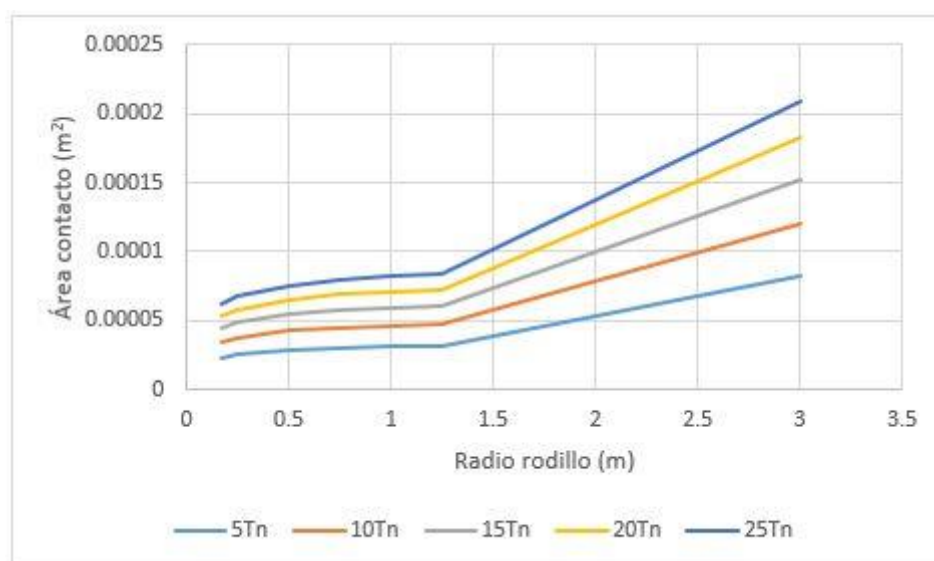


Fig. 72. Evolución de la Presión en el contacto para  $V=25$  m/s

- Área de contacto

TABLA. 34: ÁREA DE CONTACTO PARA  $V=25$  m/s

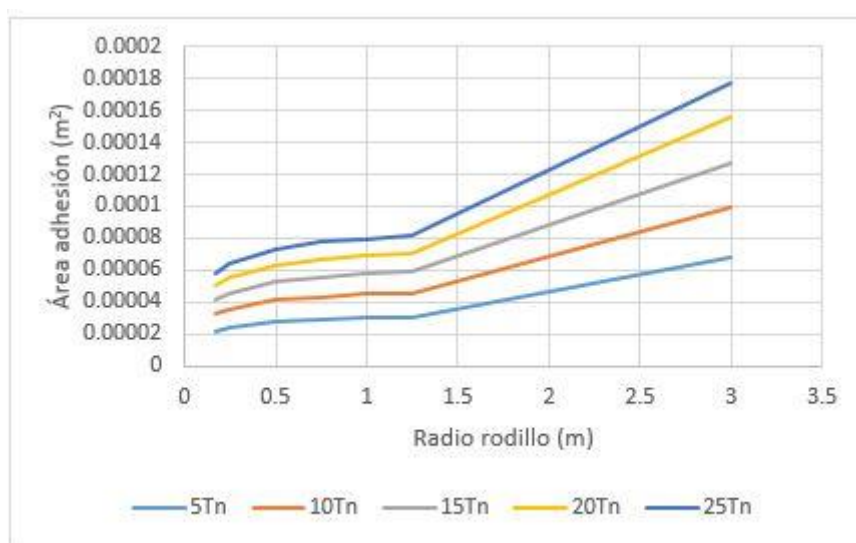
Radio (m)	Área contacto ( $m^2$ )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
<b>0.175</b>	2.35762E-05	3.50763E-05	4.49544E-05	5.39739E-05	6.2411E-05
<b>0.25</b>	2.54648E-05	3.78826E-05	4.85438E-05	5.82711E-05	6.7338E-05
<b>0.5</b>	2.8714E-05	4.27185E-05	5.46956E-05	6.55938E-05	7.5786E-05
<b>0.75</b>	3.02458E-05	4.49917E-05	5.76289E-05	6.90814E-05	7.97803E-05
<b>1</b>	3.11992E-05	4.6374E-05	5.93683E-05	7.11287E-05	8.21575E-05
<b>1.25</b>	3.17885E-05	4.72848E-05	6.0551E-05	7.25205E-05	8.37362E-05
<b>3</b>	8.20322E-05	0.00011999	0.000152636	0.000182123	0.000209282

Fig. 73. Evolución del Área de contacto para  $V=25$  m/s

- Área de adhesión

TABLA. 35: ÁREA DE ADHESIÓN PARA  $V=25$  m/s

Radio (m)	Área adhesión (m <sup>2</sup> )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	2.20933E-05	3.27686E-05	4.20378E-05	5.03759E-05	5.82736E-05
0.25	2.41818E-05	3.59228E-05	4.60454E-05	5.52561E-05	6.42182E-05
0.5	2.75582E-05	4.11343E-05	5.2504E-05	6.29719E-05	7.27597E-05
0.75	2.92392E-05	4.3489E-05	5.57129E-05	6.6734E-05	7.7434E-05
1	3.04245E-05	4.50558E-05	5.75436E-05	6.89839E-05	7.95439E-05
1.25	3.10001E-05	4.60838E-05	5.89226E-05	7.04401E-05	8.13001E-05
3	6.78876E-05	9.93002E-05	0.000126317	0.000156328	0.000176524

Fig. 74. Evolución del Área de adhesión para  $V=25$  m/s

- Wear index

TABLA. 36: WEAR INDEX PARA  $V=25$  m/s

Radio (m)	Wear index (N/mm <sup>2</sup> )				
	5Tn	10Tn	15Tn	20Tn	25Tn
0.175	0.013436444	0.019596151	0.026001335	0.030952992	0.036260708
0.25	0.007975025	0.012109473	0.015379513	0.019645872	0.026763799
0.5	0.003462583	0.00557353	0.007183786	0.008379206	0.010311608
0.75	0.00218905	0.004173909	0.005049487	0.00706976	0.009851813
1	0.001778812	0.002611059	0.005238644	0.005430949	0.006388481
1.25	0.00155329	0.00229733	0.003176024	0.00446066	0.00482652
3	0.007169654	0.010487202	0.01334054	0.014946754	0.017695853

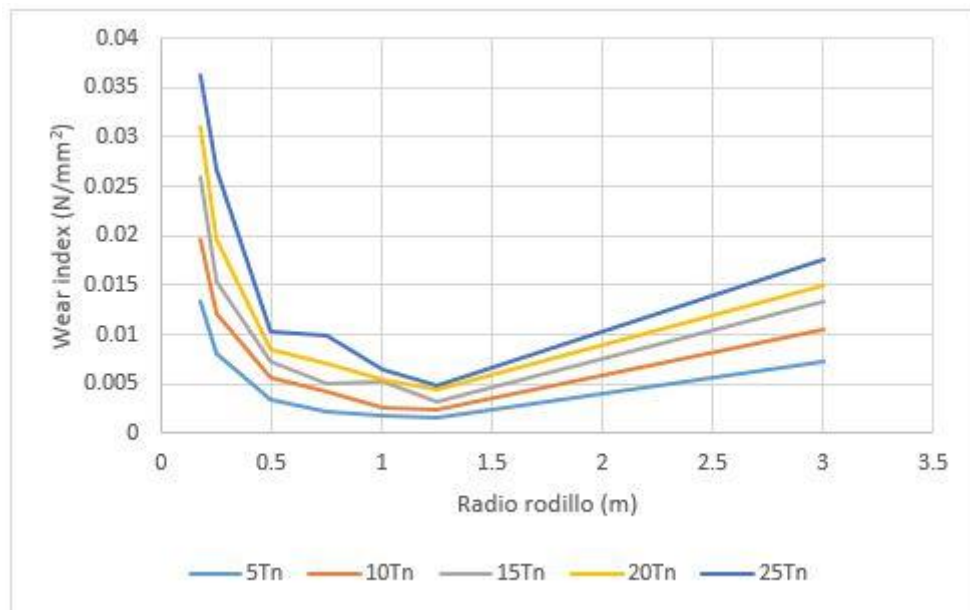


Fig. 75. Evolución de Wear index para  $V=25$  m/s

Esta última gráfica del índice de desgaste presentada en la figura 75, obtenido a 20 m/s se confirma la disminución del mismo a medida que se aumenta la velocidad de circulación y el radio de rodillo.

## 6. CONCLUSIONES

---

### 6.1 Conclusiones

Una vez concluido el proceso de simulación y análisis de gráficas, se puede afirmar que se ha alcanzado satisfactoriamente el objetivo principal de este trabajo fin de grado: *“Análisis y simulación del contacto rueda-rodillo en un sistema multicuerpo ferroviario”*.

Como ya se comentó al inicio de la memoria, ha sido necesario el cumplimiento de una serie de objetivos intermedios, con los que se ha podido llegar al objetivo final de la forma más óptima posible.

En relación a esto, para el cumplimiento de dichos objetivos se ha desarrollado un orden secuencial en el que se presentaban las distintas etapas en las que se dividía el proyecto.

En la primera de ellas se produjo la familiarización con la herramienta principal de trabajo a ser utilizada, el programa de análisis multicuerpo Universal Mechanism.

Una vez tomado el primer contacto con el programa, el diseño del banco de rodillos supuso una parte fundamental para el correcto funcionamiento del sistema.

Ya creado todo el sistema se definió el rango de velocidades y cargas a las que se iba a someter al eje calado, además de los diferentes radios de rodillo sobre los que iba a ser simulado.

Las velocidades que se impusieron al rodillo han sido de 5, 10 15, 20 y 25 m/s, que corresponden básicamente a velocidades típicas de circulación de un vehículo ferroviario no muy rápido, como por ejemplo un tren de cercanías.

Por otro lado, las cargas comprenden masas típicas tanto de trenes de pasajeros como de mercancías, siendo estas de 5, 10, 15, 20 25 Tn/eje.

Una vez seleccionadas los parámetros actuantes sobre el wheelset se determinaron una serie de radios de rodillos de bancos de ensayos.

El radio más pequeño seleccionado fue el de 0.175 m, que corresponde al radio de los rodillos del banco de ensayo del que dispone el grupo de investigación MAQLAB y que se encuentra instalado en la BMI Madrid de Renfe.

Le seguían a este los radios de 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25 m. Además, cabe destacar que también se simuló el sistema multicuerpo sobre un radio de rodillo infinito, lo que se traduce en circulación sobre vía ferroviaria normal.

En este punto, es necesario comentar que dicho radio de rodillo infinito en las gráficas se ha supuesto como  $R=3$  m, debido a la imposibilidad de graficar números reales junto al infinito.

Cuando se habían seleccionado todas las condiciones del sistema, comenzó la simulación, para lo cual se mantenía constante cada velocidad lineal de circulación y se iba probando cada radio de rodillo con todas las cargas verticales. Esto, dio lugar a 175 simulaciones, la cuales arrojaban una gran cantidad de datos con los que se iba a trabajar en Excel.

Este tratamiento de datos se ha realizado seleccionando únicamente la parte más estacionaria de la evolución de cada parámetro, debido a que normalmente, los primeros instantes de la simulación arrojan valores muy dispares, que darían lugar resultados menos exactos.

Una vez realizadas todas las simulaciones, extracciones de datos y elaboración de gráficas con los mismos, se pasó a comentar brevemente lo que ocurría en cada una, por lo que ahora cada parámetro va a ser analizado de manera global para todas las simulaciones.

Tal y como se puede observar en las gráficas de la fuerza de deslizamiento respecto del eje X, esta variable no sigue una evolución constante para ninguna de las velocidades.

Lo único que ocurre es que los valores máximos para cada carga disminuyen a medida que aumenta la velocidad de circulación.

Además, la zona de circulación sobre rodillos continúa presentando una progresión muy irregular, la cual disminuye para el caso de circulación sobre vía o radio de rodillo infinito.

De todo esto se puede deducir que para mayores velocidades de circulación y radio de rodillo, los efectos de esta fuerza en dirección del movimiento disminuyen, y por tanto en el contacto rueda-carril se produce una rodadura más pura.

Otra fuerza de deslizamiento que ha sido analizada en este proyecto ha sido en dirección Y.

En la comparación de todas sus gráficas, se aprecia como sus valores se mantienen dentro de un orden de magnitud fijo, variando únicamente en la zona de circulación sobre rodillos, durante la cual se presentan irregularidades.

Dichas irregularidades se acentúan para los casos en los que el wheelset se somete a mayor carga, sin embargo a medida que la velocidad de desplazamiento aumenta esta zona irregular se suaviza considerablemente.

Por tanto, se puede observar como el efecto de esta fuerza, en dirección transversal al movimiento, ofrece una evolución más suave cuanto mayor es la velocidad de circulación y menor la carga a la que se somete el eje calado.

El siguiente parámetro que se ha estudiado es la fuerza normal actuando sobre el wheelset, cuya evolución se mantiene constante para todas las velocidades y radio de rodillos. Esto se debe a que únicamente es función de la carga que soporta el eje durante el tiempo de circulación.

Posteriormente, aparecen en el proyecto tres parámetros que se encuentran relacionados entre sí: la presión en el contacto y las áreas de contacto y adhesión.

La presión de contacto presenta una disminución progresiva durante la zona de circulación sobre rodillos, para luego disminuir bruscamente durante la circulación en vía.

Esto se debe a que a medida que aumenta el radio de rodillo el área de contacto también aumenta y por tanto, la carga del *wheelset* se reparte en una superficie mayor, lo que deriva en una menor presión.

Por otro lado, el salto brusco que se produce durante la circulación por vía es debido a que como es necesario dar un valor de radio a esta condición, no es posible visualizar una gráfica que evolucione para todos los radios de rodillos hasta llegar al infinito. Si esto pudiera ocurrir, la gráfica contaría con una forma muy parecida a la que existe en la zona de rodillos.

En relación con este hecho, para el área de contacto pasa lo mismo pero justo al contrario, como ya se ha comentado anteriormente. Ambos parámetros permanecen constantes para todas las velocidades de circulación, dependiendo únicamente del radio del rodillo y de la carga impuesta.

Por otro lado, el área de adhesión, que representa el área del contacto en la que se producen micro-soldaduras durante la circulación, presenta la misma forma que para el área de contacto, exceptuando para la velocidad menor de este proyecto de 5 m/s, en la cual se pueden apreciar numerosos picos en su evolución.

Junto a lo anterior, también se puede apreciar como los valores de este parámetro son siempre menores a los del área total del contacto rueda-rodillo. Esto se debe a que dicho área de adhesión representa la superficie en la que existe adhesión dentro de la zona total en contacto.

Por último, se ha analizado un parámetro conocido como *Wear index* o Índice de desgaste, que como su propio nombre indica, muestra la magnitud del deterioro originado en el contacto, cuyo mínimo valor es cero.

Durante las diferentes velocidades simuladas, se ha podido observar como este parámetro cuenta con menores irregularidades en su progresión y valores más cercanos a cero a medida que se aumenta la velocidad de circulación.

En esa evolución se aprecia como sus valores disminuyen bruscamente al pasar del radio de 0.175 m al de 0.5 m, para continuar disminuyendo de manera más suave durante los demás radios de rodillo.

Finalmente, esta progresión aumenta notoriamente al someter al eje calado a una circulación en vía.

Además, puede observarse como su gráfica está claramente relacionada con la evolución de las dos fuerzas de deslizamiento.

Se puede apreciar por tanto, para la velocidad más baja de circulación, como el índice de desgaste se ve influenciado por la evolución que sigan  $F_{xcreep}$  y  $F_{ycreep}$ , presentando así una forma muy parecida a la de ambas.

## 6.2 Trabajos futuros

Como se ha podido comprobar en este proyecto, el programa informático *Universal Mechanism* ofrece infinidad de posibilidades en cuanto al análisis y simulación de diferentes sistemas multicuerpo.

Continuando con lo presentado en dicho trabajo fin de grado, se exponen a continuación algunos ejemplos de posibles trabajos que podrían resultar de interés dentro del ámbito estudiado:

1. Analizar variables diferentes a las estudiadas en este proyecto, ya sean referentes al contacto o a cualquier ámbito del desplazamiento.
2. Estudiar el comportamiento de un coche completo aumentando el número de ejes sobre el banco de ensayos.
3. Imponer un giro en los rodillos para simular circulación en curva.
4. Seleccionar distintas velocidades de giro para cada rueda del *wheelset*.
5. Comprobar las condiciones límite para las cuales el eje calado podría sufrir descarrilamiento.
6. Estudiar el contacto rueda-rodillo utilizando métodos de cálculo diferentes al FASTSIM y observar diferencias en la exactitud.

## 7. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

---

### 7.1 Planificación

En este apartado se presenta la distribución del tiempo total empleado en la realización del proyecto.

Para su realización se dispuso de un periodo de cuatro meses y medio, comprendidos entre Febrero y mediados de Junio.

Dentro de este periodo se distinguen varias fases en las que se ha organizado el trabajo:

➤ Planteamiento del proyecto (1 semana):

En esta fase se define el objetivo que se quiere conseguir con la realización del proyecto, la metodología que se pretende emplear y las distintas fuentes de información relacionadas con el tema a tratar.

➤ Familiarización con el programa informático *Universal Mechanism* (1 semana):

Durante este periodo se lleva a cabo la toma de contacto con la herramienta necesaria para la realización del proyecto. Este aprendizaje se apoya en los manuales del programa donde aparecen numerosos ejemplos.

➤ Creación del sistema multicuerpo (2 semanas):

En esta etapa se crea el banco de ensayo representado por dos rodillos sobre los que circula el eje calado y se determinan las diferentes condiciones de contorno del conjunto.

➤ Realización de las diferentes simulaciones (3 semanas):

Cuando ya se tiene el banco de ensayos definido correctamente, se procede a estudiar su comportamiento en función de las diferentes velocidades de circulación, radios de rodillos y cargas sobre el *wheelset*.

➤ Tratamiento de resultados obtenidos (2 semanas):

Durante estas tres semanas se exportan los datos obtenidos en UM a Excel para trabajar con ellos y obtener gráficas útiles con el fin de facilitar su posterior análisis.



➤ Análisis de resultados (1 semana):

Llegados a este punto, se extraen conclusiones de las comparaciones entre las diferentes condiciones de circulación del eje calado sobre los rodillos.

➤ Redacción de la memoria (8 semanas):

En esta última etapa se presentan los conceptos teóricos referentes al tema del proyecto, los pasos seguidos para la creación y simulación del modelo y el posterior análisis de los resultados obtenidos, todo ello junto a tablas y figuras.

A continuación se presenta el tiempo de dedicación previsto para cada tarea del proyecto en un diagrama de Gantt.

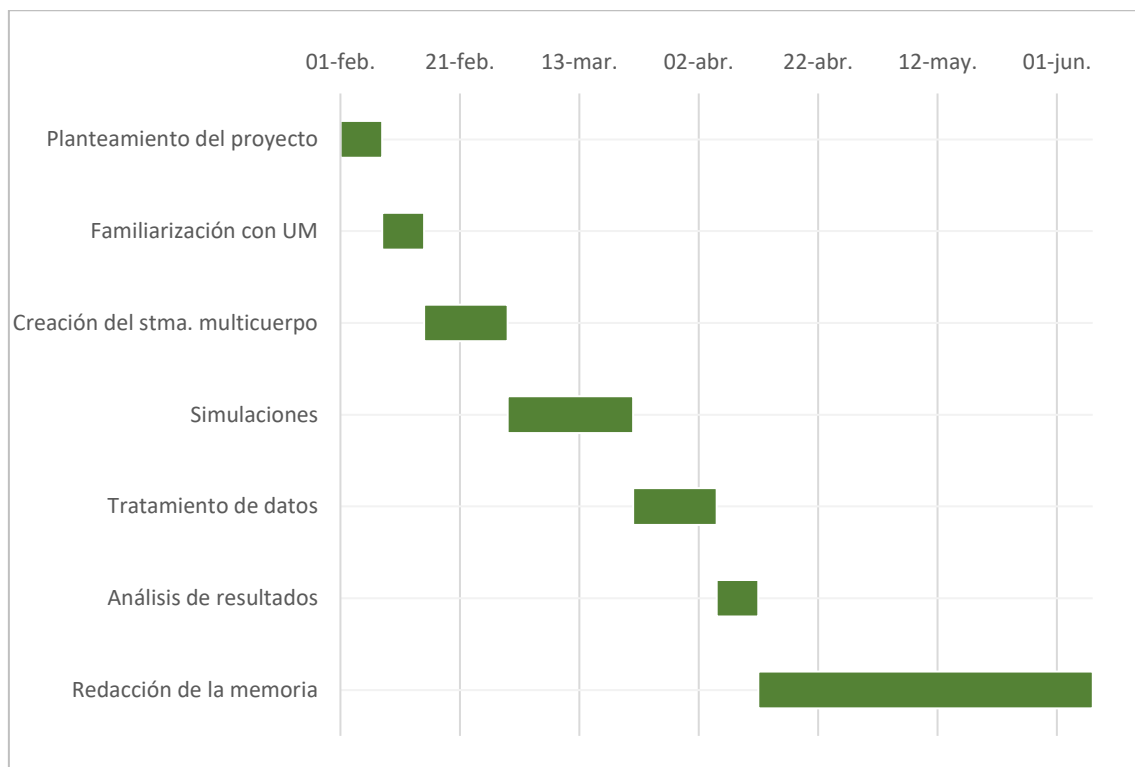


Fig. 76. Diagrama de Gantt

### 7.3 presupuesto

A continuación se muestra el coste derivado de todo el proyecto, teniendo en cuenta el coste de personal, equipos y softwares informáticos y otros costes indirectos.

TABLA. 37: COSTE DE PERSONAL

SALARIO DE PERSONAL			
Descripción	Coste/hora (€)	Nº hora empleadas	Coste imputable (€)
Jesús López Valero	25	270	6.750
TOTAL			6.750

TABLA. 38: COSTE DE EQUIPOS

EQUIPO INFORMÁTICO					
Descripción	Coste (€)	% utilización	Dedicación meses	Periodo depreciación (meses)	Coste imputable (€)
Ordenador personal	600	70	4,5	24	78,75
TOTAL					78,75

TABLA. 39: COSTE DE SOFTWARE

SOFTWARE INFORMÁTICO					
Descripción	Coste (€)	% utilización	Dedicación (meses)	Periodo depreciación (meses)	Coste imputable (€)
Microsoft Office	149	60	4,5	12	33,53
Universal Mechanism	6.000	40	4,5	12	900
TOTAL					933,53

En las tablas 28 y 39, el coste de los equipos y de los softwares utilizados en la realización del proyecto se ha calculado utilizando la siguiente fórmula:

$$C = P * U * \frac{T}{D} \quad (7.3.1)$$

Donde:

- C= Coste total
- P= Precio de adquisición del producto
- U= Porcentaje de utilización
- T= Tiempo de uso
- D= Periodo de depreciación

TABLA. 40: COSTES TOTALES

CONCEPTO	COSTES TOTALES
Personal	6.750
Equipos	78,75
Softwares informáticos	933,53
Otros	1.552,46
Subtotal	9.314,74
IVA (21%)	1.956,10
<b>TOTAL</b>	<b>11.270,84</b>

Dentro de la tabla 40, el concepto definido como “Otros” incluye los gastos indirectos de la realización del proyecto y que suponen el 20 % de la suma de los costes de personal, equipos y software. Dentro de ellos se encuentran los costes de electricidad, desplazamientos o dietas, entre otros.

Además, es necesario incluir el IVA, cuyo porcentaje aplicado sobre la suma de los costes es del 21 %.

## 8. REFERENCIAS

---

- [1] A. Picón. “España, referente mundial en alta velocidad”. *ELEXPORTADOR Revista para la internacionalización*, Observatorio, pp. 1-4, agosto 2018.  
<https://www.icex.es/icex/es/Navegacion-zona-contacto/revista-el-exportador/observatorio2/REP2018795143.html>  
(Acceso: mayo 2019)
- [2] Apuntes de la asignatura “Ingeniería Ferroviaria”. Universidad Carlos III de Madrid
- [3] Página web Ferropedia.  
<http://www.ferropedia.es/wiki/Bogie>  
(Acceso: mayo 2019)
- [4] The Railway Technical Website.  
<http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-1/bogies.html>  
(Acceso: mayo 2019)
- [5] Apuntes de la asignatura Proyectos de construcción y obras civiles. Tema 4: Ingeniería Ferroviaria. Grado En Ingeniería Geomática Y Topografía Universidad Politécnica de Madrid.
- [6] H. Jung, T. Munker, G. Kampmann, K. Rave, C. Fritzen, O. Nelles, “A Novel Full Scale Roller Rig Test Bench for SHM Concepts of Railway Vehicles”, presentada en XIII European Workshop On Structural Health Monitoring, Bilbao, 5-8 jul, 2016. [En línea].
- [7] S. Myamlin, J. Kalivoda, L. Neduzha, “Testing on Railway Vehicles Using Roller Rigs”, presentada en XX International Scientific Conference Transbaltica, 2017.
- [8] “Simulation of Rail Vehicle Dynamics. User’s manual”, Universal Mechanism, 2016.
- [9] S. Iwnicki. Handbook of Railway Vehicle Dynamics, 1st ed. Boca Ratón: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [10] P. M. Jurdado, “Estudio dinámico del contacto rueda-carril en la circulación ferroviaria y análisis de defectos del carril”, Trabajo Fin de Grado, Dpto. De Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2017.
- [11] J. Fernández Aceituno, “Modelo de simulación ferroviaria con tablas precalculadas y análisis simbólico”, Trabajo Fin de Máster. Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2013.
- [12] Shabana, Ahmed A. Dynamics of Multibody Systems, 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2005.

- [13] Página web Wikiwand. “Sistemas multicuerpo”.  
[http://www.wikiwand.com/es/Sistema\\_multicuerpo](http://www.wikiwand.com/es/Sistema_multicuerpo)  
(Acceso: mayo 2019)
- [14] Página web de Simpack:  
<http://www.simpack.com/>  
(Acceso: mayo 2019)
- [15] Página web de Vampire:  
<http://www.vampire-dynamics.com/>  
(Acceso: mayo 2019)
- [16] Página web de VI-Rail:  
<https://www.vi-grade.com/en/products/vi-rail/>  
(Acceso: mayo 2019)
- [17] “UM Loco. Getting started”, Universal Mechanism, 2016
- [18] J. Monje Rubio, “Análisis del contacto rueda-soporte en sistemas ferroviarios”, Trabajo Fin de Grado, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2017.
- [19] BOE núm. 234, de 30 de septiembre de 2015
- [20] *Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.* UNE-EN ISO 12100:2012.
- [21] *Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Medidas de protección relativas a riesgos eléctricos.* UNE-EN 50153:2014.
- [22] *Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Ensayos de choque y vibración.* UNE-EN 61373:2011.
- [23] *Aplicaciones ferroviarias. Ensayos y simulaciones para la aceptación de las características dinámicas de los vehículos ferroviarios. Comportamiento dinámico y ensayos estáticos.* UNE-EN 14363:2017.
- [24] *Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros. Medición y evaluación.* UNE-EN 12299:2010.
- [25] *Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ejes. Requisitos de producto.* UNE-EN 13261:2009+A1:2011.
- [26] *Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Perfil de rodadura.* UNE-EN 13715:2007+A1:2011.
- [27] *Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Requisito de producto.* UNE-EN 13262:2005+A2:2011.
- [28] *Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Ensayos del material rodante al término de su construcción y antes de su puesta en servicio.* UNE-EN 50215:2011.

- [29] *Aplicaciones ferroviarias. Requisitos estructurales de las cajas de los vehículos ferroviarios. Parte 1: Locomotoras y material rodante de viajeros (y método alternativo para vagones de mercancías).* UNE-EN 12663-1:2011+A1:2015
- [30] *Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Métodos para especificar los requisitos estructurales de los bastidores de bogie.* UNE-EN 13749:2012